

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WANDER DA CRUZ

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS  
ANTRÓPICAS.  
ESTUDO DE CASO: UHE MAUÁ

CURITIBA  
2015

WANDER DA CRUZ

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS  
ANTRÓPICAS.

ESTUDO DE CASO: UHE MAUÁ

Tese apresentada ao Curso de Pós-  
Graduação em Ciências Geodésicas,  
Setor de Ciências da Terra, Universidade  
Federal do Paraná, como requisito parcial  
à obtenção do título de Doutor em  
Ciências Geodésicas

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA  
2015

Da Cruz, Wander

Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas:  
estudo de caso: UHE Mauá / Wander da Cruz. – Curitiba, 2015.  
145 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná. Setor  
de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas.

Orientador: Pedro Luis Faggion

Bibliografia: p. 139-145

1. Estruturas. 2. Geodésia. 3. Engenharia Civil. 4. Geologia.  
I. Faggion, Pedro Luis. II. Título.

CDD 526.51

## TERMO DE APROVAÇÃO

WANDER DA CRUZ

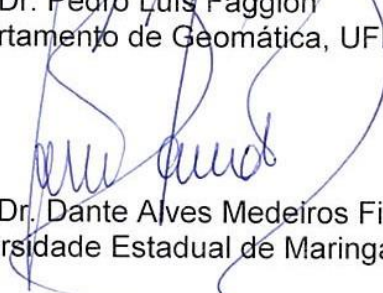
### "INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS ANTRÓPICAS. ESTUDO DE CASO: UHE MAUÁ"

Tese nº 95 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

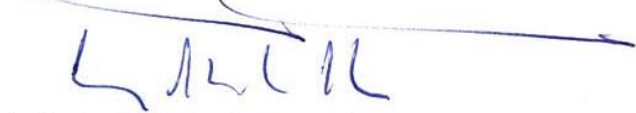
Orientador:




Prof. Dr. Pedro Luis Faggion  
Departamento de Geomática, UFPR



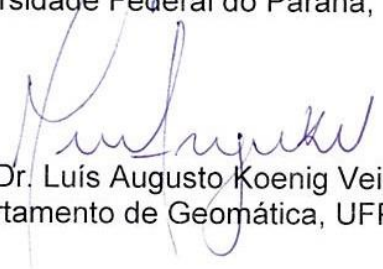
Prof. Dr. Dante Alves Medeiros Filho  
Universidade Estadual de Maringá, UEM



Prof. Dr. Luiz Alkimin de Lacerda  
Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em  
Engenharia, UFPR



Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira  
Universidade Federal do Paraná, UFPR



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga  
Departamento de Geomática, UFPR



Profª. Drª. Regiane Dalazoana  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 27 de julho de 2015.

À Glória, minha esposa,  
aos meus pais, Geraldo e Selmira,  
e aos meus avós, Casimiro e Lenir.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, simplesmente por tudo.

À minha esposa, amiga e parceira Glória, pelo apoio em todos os momentos, paciência e ajuda na revisão deste trabalho.

Aos meus pais e avós pelo amor, incentivo e atenção sempre dedicados.

Aos meus sogros Darci e Catarina, aos cunhados Jairo e Patrícia, aos sobrinhos Lucas, João Henrique e André por compreender minhas ausências em alguns momentos.

Ao prof. Dr. Pedro Luis Faggion pela orientação, conselhos, confiança e a constante disposição em ajudar nas mais diversas necessidades.

Ao prof. Dr. João Francisco Galera Monico e ao prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga pelas valiosas sugestões no Seminário I, que contribuíram muito no balizamento deste trabalho.

Ao prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal pelas inúmeras discussões sobre diversos assuntos que contribuíram, inclusive, para meu crescimento como docente.

Ao prof. Dr. Raul Friedman pela prontidão em auxiliar sempre que necessário.

A todos os professores do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.

À Mônica Kleuser, secretaria do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela atenção e disposição em resolver todos os problemas burocráticos.

A Companhia Paranaense de Energia – COPEL e ao engenheiro Marcos Alberto Soares, pela colaboração contínua e eficiente durante a realização deste trabalho.

Aos Institutos Lactec e à geóloga Dra. Isabella Françoso Rebutini Figueira pela colaboração sempre que necessário.

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná que, durante meu período de docência nesta Instituição, sempre permitiu minhas ausências para as viagens de coleta de dados.

Aos alunos de iniciação científica Evelin Gonçalves, Leandro de Souza e Marcelo Mattos pela ajuda e parceria nas cansativas campanhas de coleta de dados em campo e em alguns processamentos que me pouparam um tempo considerável.

Ao aluno de iniciação científica Thiago Igarashi um agradecimento especial pela importantíssima ajuda com a programação do sistema, permitindo que eu direcionasse a maior parte do tempo à pesquisa.

Aos amigos de Centro Politécnico André Tedeschi, prof<sup>a</sup>. Erica Matos, Felipe Suci, Marcos Basso, Nádisson Pavan, prof. Miguel Muguio, Niarkios, Natália Sabariego, Pierre, e todos os que não estão mencionados, mas que sempre estiveram em contato nas conversas técnicas e nos papos divertidos, colaborando sempre que necessário.

Aos demais amigos que, apesar da minha falta de tempo, sempre estiveram dispostos a um momento de descontração.

À CAPES, ao CNPq e à Aneel pelas bolsas de estudos concedidas em diferentes momentos do desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, por disponibilizar os laboratórios e instalações.

Ao Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG) e ao Laboratório de Topografia (LABTOPO) pela disponibilização dos equipamentos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.  
Jean Cocteau

## RESUMO

Dentro de uma ideia de multidisciplinaridade entre as Ciências Geodésicas e demais áreas, esta pesquisa segue as diretrizes da IAG para buscar a integração dos resultados obtidos no monitoramento de estruturas antrópicas com técnicas da Geodésia, da Geologia e da Engenharia Civil. Na Geodésia, o monitoramento decorre da combinação dos resultados dos métodos espaciais e terrestres de levantamentos tridimensionais. Na Engenharia Civil são utilizados medidores triortogonais para verificação de deslocamentos relativos. Na Geologia, sensores de fibra óptica são instalados na barragem e sismógrafos implantados na rede de monitoramento para verificação de subsidência e sismicidade. A partir do cálculo de coeficientes de correlação, avalia-se a influência destas variáveis, umas sobre as outras. Pretende-se, a partir da utilização de métodos distintos que podem ser aplicados na obtenção de dados necessários à auscultação geodésica de barragens, combinar e interpretar estes dados de modo a proporcionar ao destinatário final os resultados necessários à sua área de atuação, para o encaminhamento das providências que lhe são cabíveis. O estudo de caso é realizado na UHE Mauá e inova ao integrar monitoramento geológico e proveniente da engenharia civil, além de combinar técnicas GNSS e de levantamentos tridimensionais terrestres para a auscultação geodésica. Na avaliação da estabilidade da rede geodésica, verificam-se as diferenças estatísticas das coordenadas na época adotada como referência e na época do seu levantamento, dentro do grau de confiança de 95%. As tabelas que contêm as coordenadas dos pontos de monitoramento MSUs e MGEs (à jusante e à montante, respectivamente) revelam a diferença estatística das coordenadas ao longo do tempo, o que indica movimentação dos pontos monitorados. As elipses de erro apontam os maiores deslocamentos na região central da barragem em razão da susceptibilidade à pressão da água por causa da distância dos apoios ou ombreiras. Apesar da verificação de deslocamentos, isto não caracteriza, necessariamente, risco quanto à segurança da barragem. As movimentações ou deslocamentos podem ocorrer devido às variações térmicas decorrentes das estações do ano e em razão da variação do volume de água do reservatório. A avaliação dos deslocamentos depende da correlação entre estas variáveis, de acordo com o cruzamento de informações derivadas das diferentes áreas relacionadas, ou seja, da combinação entre as variáveis fornecidas pelo monitoramento geológico, geodésico e da engenharia civil.

Palavras-chave: Monitoramento de Estrutura. Integração de dados. Geodésia. Engenharia Civil. Geologia. Levantamentos Tridimensionais.



## **ABSTRACT**

Within a multidisciplinary approach between Geodetic Sciences and other areas, this research follows the IAG guidelines aiming for the integration of results obtained in anthropogenic structures monitoring using Geodesy, Geology and Civil Engineering techniques. In Geodesy, the monitoring originates from the combination of results from spatial and terrestrial three-dimensional survey methods. In Civil Engineering, tri-orthogonal meters are used for relative displacements check. In Geology, fiber optic sensors are installed in the dam, while seismographs are deployed in the monitoring network to check for subsidence and seismicity. From the correlation coefficients calculation, it is possible to evaluate the influence of these variables on each other. The use of several methods available for obtaining the data required for geodesic auscultation of dams attempts to combine and interpret this data, in order to provide the final recipient with the necessary results for his area of operation, so that the applicable actions can be taken. The case study is conducted at Mauá Hydro Power Plant and innovates by integrating geological and civil engineering monitoring, while combining GNSS techniques and three-dimensional terrestrial surveys for the geodesic auscultation. In the geodetic network stability evaluation, statistical differences in the coordinates arise between the adopted reference time and survey time, with a confidence level of 95%. The tables containing the coordinates of the MSUs and MGEs monitoring points (upstream and downstream, respectively) show statistical difference in coordinates over time, which indicates movement of the monitored points. The error ellipses indicate major shifts occurring in the central region of the dam due to susceptibility to water pressure, caused by the distance of the supports or shoulder pads. Although displacements were detected, this does not necessarily characterize risk for the safety of the dam. The changes or shifts can occur due to temperature variations resulting from seasons, or due to variations of the reservoir water volume. The evaluation of the displacements depends on the correlation between these variables, according to the intersection information derived from different related areas. In other words, the combination of the variables supplied by geological, geodetic and civil engineering monitoring.

**Key words:** Structures Monitoring. Data Integration. Geodesy. Geology. Civil Engineering

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REFERENCIAL GEODÉSICO, GEOD. CARTESIANO E GEOD. CART. LOCAL .....	36
FIGURA 2 - SISTEMA GEODÉSICO LOCAL E O SISTEMA DA BARRAGEM .....	37
FIGURA 3 - CÁLCULO DO ÂNGULO HORIZONTAL A PARTIR DE DOIS AZIMUTES .....	47
FIGURA 4 – ELIPSE DE ERRO .....	50
FIGURA 5 - PONTOS DE MONITORAMENTO DAS JUNÇÕES DE BLOCOS .....	52
FIGURA 6 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO MÉTODO POLAR .....	53
FIGURA 7 - MEDIDOR TRIORTOGONAL DESMONTADO.....	56
FIGURA 8 - LEITURA UTILIZANDO RELÓGIO COMPARADOR DIGITAL E SISTEMAS DE EIXOS .....	57
FIGURA 9 - FUROS DE SONDAGEM ONDE FORAM INSTALADOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA .....	58
FIGURA 10 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES SOBRE UM DOS FUROS DE SONDAGEM .....	59
FIGURA 11 - RESPOSTA DA FIBRA EM FUNÇÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO. ....	60
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.....	66
FIGURA 13 - PROJETO DA UHE MAUÁ.....	67
FIGURA 14 - BARRAGEM ANTES (A) E DEPOIS (B) DA FORMAÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	68
FIGURA 15 - ADAPTADOR UTILIZADO PARA TRAVAR O PARAFUSO CALANTE .....	69
FIGURA 16 - CALAGEM DAS BASES NIVELANTES.....	70
FIGURA 17 - MEDIDA DA ALTURA DA BASE UTILIZANDO PAQUÍMETRO .....	71
FIGURA 18 - PARAFUSO CALANTE TRAVADO .....	71
FIGURA 19 - ALTURA DO PINO ADAPTADOR E DO PRISMA.....	72
FIGURA 20 - POSIÇÃO DOS PONTOS ONDE FORAM FEITAS AS SÉRIES DE LEITURA.....	73
FIGURA 21 - PROCESSO PARA OBTENÇÃO DA ALTURA DOS CONJUNTOS DE BASES E PRISMAS.....	73

FIGURA 22 - CROQUI COM PONTOS DA REDE GEODÉSICA DA UHE MAUÁ ....	74
FIGURA 23 - PILAR PG03 E DISPOSITIVO DE CENTRAGEM FORÇADA.....	74
FIGURA 24 - ANTENA GPS SOBRE CG01.....	75
FIGURA 25 - ESTAÇÃO TOTAL NO PG01 E PARAFUSO CALANTE TRAVADO...	76
FIGURA 26 - PRISMA NO PILAR PG02 .....	77
FIGURA 27 - FIXAÇÃO DO D.C.F. NA ESPERA.....	77
FIGURA 28 - ESTAÇÃO TOTAL E PRISMA PRONTOS PARA USO.....	78
FIGURA 29 - PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA.....	78
FIGURA 30 - PONTOS DE MONITORAMENTO E MEDIDOR TRIORTOGONAL....	79
FIGURA 31 - PRISMAS DURANTE A MEDIDA ELETRÔNICA DA DISTÂNCIA .....	79
FIGURA 32 - MSU02 E PG01 .....	80
FIGURA 33 - PRISMA PERMANENTE INSTALADO EM UM MGE .....	81
FIGURA 34 - PONTOS DE MONITORAMENTO À JUSANTE.....	81
FIGURA 35 - TRIPÉ MODIFICADO .....	82
FIGURA 36 – UTILIZAÇÃO DO TRIPÉ MODIFICADO .....	83
FIGURA 37 - BIPÉ DE APOIO A BALIZA.....	83
FIGURA 38 - MIRA E SISTEMA DE ESPELHO.....	84
FIGURA 39 - DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS DA ARQUITETURA DO SISTEMA .....	87
FIGURA 40 - PROCESSO 1: GNSS, REDUÇÃO À ÉPOCA INICIAL.....	88
FIGURA 41 - PROCESSO 2: GNSS, VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO.....	89
FIGURA 42 - PROCESSO 3: GNSS, TRANSFORMAÇÃO DE REFERENCIAL.....	90
FIGURA 43 - CONFIGURAÇÃO DA REDE.....	91
FIGURA 44 - PROCESSO 4: REDE .....	93
FIGURA 45 - DEPÓSITO DE DADOS 1 .....	94
FIGURA 46 - PROCESSO 5: GALERIA.....	95
FIGURA 47 - DEPÓSITO DE DADOS 2: COORDENADAS DAS EGI'S .....	96
FIGURA 48 - PROCESSO 6: TOPO3D MONTANTE.....	96
FIGURA 49 - CROQUI INDICANDO AS LINHAS DE VISADA DA IRRADIAÇÃO 3D .....	97
FIGURA 50 - DEPÓSITO DE DADOS 3: COORDENADAS DOS MSUs.....	98
FIGURA 51 - PROCESSO 7: TOPO3D: JUSANTE .....	99

FIGURA 52 - DEPÓSITO DE DADOS 4: COORDENADAS DOS MGEs.....	99
FIGURA 53 - PROCESSO 8: RESULTADOS .....	100
FIGURA 54 - PROCESSO 9: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO .....	101
FIGURA 55 – MENU DEFINIÇÃO DE REFERENCIAL.....	102
FIGURA 56 – TRANSFORMAÇÃO PARA SISTEMA GEODÉSICO CARTESIANO .....	103
FIGURA 57 – MENU GPS – REDUÇÃO À ÉPOCA INICIAL.....	104
FIGURA 58 – REDUÇÃO À ÉPOCA DE REFERÊNCIA .....	104
FIGURA 59 – TRANSFORMAÇÃO PARA O SISTEMA DE BARRAGEM .....	105
FIGURA 60 – MENU NIVELAMENTO GEOMÉTRICO .....	106
FIGURA 61 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO .....	106
FIGURA 62 – INSERIR DADOS BRUTOS DA ESTAÇÃO TOTAL .....	108
FIGURA 63 – CONVERSÃO DE FORMATOS.....	109
FIGURA 64 – DADOS DA ESTAÇÃO TOTAL INSERIDOS NO SISTEMA .....	110
FIGURA 65 – ARQUIVO .GSI2 INTERNO DO SISTEMA .....	110
FIGURA 66 – MENU GEODÉSIA – REDE - TOPOGRAFIA .....	111
FIGURA 67 – CARREGAR DADOS BRUTOS PARA PROCESSAMENTO DA REDE .....	112
FIGURA 68 – CARREGAR ARQUIVOS COM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS.....	113
FIGURA 69 - LEITURAS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS .....	113
FIGURA 70 – LEITURAS APÓS DETECÇÃO DE OUTLIERS.....	114
FIGURA 71 – AJUSTAMENTO DA REDE .....	114
FIGURA 72 – SALVAR COORDENADAS AJUSTADAS.....	115
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DE COORDENADAS .....	115
FIGURA 74 – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DE ÉPOCAS DISTINTAS.....	116
FIGURA 75 – CÁLCULO DA IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL .....	118
FIGURA 76 – CARREGA DADOS BRUTOS E DETECTA OUTLIERS.....	119
FIGURA 77 – CARREGA DADOS ATMOSFÉRICOS .....	119
FIGURA 78 – CALCULO DAS COORDENADAS POR IRRADIAÇÃO.....	120
FIGURA 79 – MENU POLIGONAL TOPOGRÁFICA.....	129

FIGURA 80 – CÁLCULO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA DE INSPEÇÃO.....	130
FIGURA 81 – ELIPSES DE ERRO DOS PONTOS A MONTANTE .....	132

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS .....	18
QUADRO 2 - CAMPO DE VELOCIDADES OBTIDO COM O VEMOS2009 .....	30
QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS SÍSMICOS.....	62
QUADRO 4 - COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHAS 15 e 16 .....	107
QUADRO 5 - COMPARAÇÃO DAS COORDENADAS “Z” DA REDE ENTRE DUAS CAMPANHAS .....	107
QUADRO 6 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHA 15.....	116
QUADRO 7 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHA 16.....	117
QUADRO 8 – COMPARAÇÃO DAS COORDENADAS DA REDE ENTRE DUAS CAMPANHAS .....	117
QUADRO 9 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO PG01 .....	121
QUADRO 10 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	121
QUADRO 11 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO PG02 .....	122
QUADRO 12 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	122
QUADRO 13 – MÉDIA DAS COORDENADAS DOS MSUs OBTIDAS POR PG01 E PG02.....	123
QUADRO 14 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	124
QUADRO 15 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO CG01 .....	124
QUADRO 16 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	125
QUADRO 17 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO CG02 .....	125
QUADRO 18 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	125
QUADRO 19 - COORDENADAS DOS PONTOS DE JUSANTE A PARTIR DO PG03 .....	127
QUADRO 20 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO .....	128

QUADRO 21 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA DE INSPEÇÃO.....	131
--	-----

## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CG	“Centragem Geodésica”
EGI	Estação Geodésica Interna
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
MED	Medida Eletrônica de Distância
MSU	Pontos de Monitoramento de Superfície
MJ	Pontos de Monitoramento de Jusante
MW	Megawatt (unidade de Potência)
PG	Pilar Geodésico
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UGGI	União Geodésica e Geofísica Internacional
UHE	Usina Hidrelétrica
USP	Universidade de São Paulo
VEMOS	Modelo de Velocidades para a América do Sul e Brasil



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	18
1.1 OBJETIVO.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
1.3 JUSTIFICATIVA .....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	23
2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE MONITORAMENTO.....	24
2.2 REDE GEODÉSICA .....	28
2.2.1 Redução das coordenadas.....	29
2.2.2 Teste estatístico .....	32
2.2.3 Transformação para o Sistema de Barragem.....	35
2.2.4 Detecção de <i>outliers</i> e ajustamento da rede geodésica .....	42
2.2.4.1 Critérios para minimização de erros sistemáticos e detecção e minimização de <i>outliers</i> .....	42
2.2.4.2 Obtenção das coordenadas da rede .....	44
2.2.4.3 Elipses de erros.....	48
2.3 POLIGONAÇÃO.....	50
2.4 IRRADIAÇÃO 4D .....	53
2.5 INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS DE MONITORAMENTO .....	54
2.5.1 Medidor triortogonal.....	55
2.5.2 Sensores de fibra óptica.....	57
2.5.3 Sismógrafos .....	61
2.5.4 Cálculo do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson .....	62
3 METODOLOGIA.....	65
3.1 ÁREA DE ESTUDOS .....	65
3.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PRISMA .....	68
3.2.1 Fixação de um parafuso calante da base nivelante .....	69
3.2.2 Medida preliminar da altura do prisma .....	70
3.2.3 Determinação precisa da altura do conjunto composto por base nivelante e prisma .....	72
3.3 LEVANTAMENTO DA REDE POR GNSS .....	74
3.4 LEVANTAMENTO DA REDE COM ESTAÇÃO TOTAL .....	76
3.5 POLIGONAÇÃO.....	77
3.6 IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	80
3.7 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRIMEIRA ORDEM.....	82
3.8 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL .....	84
3.8.1 Diagrama de fluxo de dados.....	85
3.8.2 Redução das coordenadas à época de referência .....	88
3.8.3 Verificação da estabilidade da rede geodésica .....	89
3.8.4 Transformação para o referencial da barragem .....	90
3.8.5 Ajustamento de observações e detecção de <i>outliers</i> .....	91
3.8.5.1 Depósito de dados 1 (D1).....	94
3.8.6 Poligonação.....	94
3.8.6.1 Depósito de dados 2 (D2).....	95
3.8.7 Irradiação – Determinação dos MSUs.....	96
3.8.7.1 Depósito de dados 3 (D3).....	98
3.8.8 Irradiação – Determinação dos MGEs.....	98

3.8.8.1 Depósito de dados 4 (D4).....	99
3.8.9 Verificação de deslocamentos.....	100
3.8.10 Integração de dados de monitoramento geodésico, geológico e da engenharia civil.....	100
4 RESULTADOS .....	102
4.1 VERIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS DA REDE GEODÉSICA.....	102
4.2 VERIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS MONITORADOS .....	118
4.2.1 Determinação das coordenadas dos pontos à montante (MSUs) .....	120
4.2.2 Determinação das coordenadas dos pontos à jusante (MGEs) .....	126
4.2.3 Determinação das coordenadas dos pontos da poligonal (EGIs).....	129
4.2.4 Representação gráfica dos deslocamentos.....	132
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	134
5.1 CONCLUSÕES .....	134
5.2 RECOMENDAÇÕES .....	137
REFERÊNCIAS .....	139

## 1 INTRODUÇÃO

Em 1979, o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) publicou o documento intitulado Diretrizes para Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação, caracterizando um marco no país para a discussão sobre a segurança das barragens. Objetivando a elaboração de projetos e construção de barragens seguras e diminuir o nível de risco destas construções, em 1999 é lançado o Guia Básico de Segurança de Barragem (CBDB, 2001).

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (2001), cada barragem deve ser classificada em função do seu risco de ruptura (QUADRO 1).

CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA	PERDA DE VIDAS	ECONÔMICO, SOCIAL E DANOS AMBIENTAIS <sup>1</sup>
Muito alta	Significativa	Dano excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito baixa	Nenhuma	Dano mínimo

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS

FONTE: ADAPTADO DE COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (2001)

O Ministério da Integração Social lança, em 2002, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens a fim de estabelecer uma rotina básica de procedimentos de segurança a serem aplicados na construção de novas barragens e na manutenção daquelas existentes. Este manual também indica que cada barragem deve possuir instrumental adequado às suas dimensões e que as leituras nesses instrumentos sejam realizadas e analisadas de forma periódica (CBDB, 2001).

Reforçando a questão de segurança em barragens, em 2010, é sancionada a Lei 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Nesta lei, fica determinado que a Agência Nacional das Águas (ANA) é incumbida de gerenciar os órgãos fiscalizadores das barragens e coordenar e

---

<sup>1</sup> Os critérios de classificação da categoria **Danos Econômicos, Sociais e Ambientais** deve ser baseado nas consequências das perdas em relação à região atingida.

encaminhar anualmente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos o Relatório de Segurança de Barragem (ANA, 2010).

Ainda não existe, no Brasil, legislação específica a respeito de segurança de barragens e os espaços para discussão nos simpósios do CBDB devem contribuir para a criação de uma legislação adequada (SILVA, 2012).

Na ausência de lei especial, o monitoramento de estruturas do porte de barragens é realizado de forma multidisciplinar, porém, cada uma das áreas inseridas no contexto de monitoramento (Geologia, Engenharia Civil e Geodésia) desenvolve suas pesquisas isoladamente.

Na Engenharia Civil emprega-se a instrumentação de segurança aplicando pêndulos diretos e invertidos, extensômetros e medidores triortogonais, entre outros. A Geodésia fornece equipamentos e métodos para a realização da auscultação geodésica, envolvendo levantamentos tridimensionais. A Geologia utiliza sismógrafos e sensores de deslocamento fabricados com fibra óptica.

A tendência atual na comunidade científica internacional é a promoção de programas interdisciplinares de atuação, com a cooperação mútua entre cientistas. O Conselho Internacional para a Ciência (ICSU) promove atividade científica internacional nos diferentes ramos da ciência e suas aplicações para o benefício da humanidade (ICSU, 1999). A Associação Internacional de Geodésia (IAG) faz parte deste Conselho e atua na promoção da cooperação científica geodésica.

Inserindo a atuação das Ciências Geodésicas dentro da tendência da comunidade científica internacional, seguindo as diretrizes da IAG, busca-se a interação entre as diferentes áreas. Neste aspecto, pondera-se a utilização dos estudos realizados dentro do âmbito da Geodésia por profissionais de outras áreas, de uma forma simples, clara e proveitosa.

A partir disso, nesta pesquisa é desenvolvido um estudo de caso na UHE Mauá, situada entre os Municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, no Estado do Paraná. Utilizando-se de técnicas geodésicas, a partir da combinação de GNSS e levantamentos tridimensionais terrestres, resultados de monitoramento geológico e da

Engenharia Civil, inova-se ao integrar as diferentes fontes de dados para a auscultação geodésica, a partir de um sistema especialmente implementada para este fim.

Com este caráter inovador, promove-se a combinação dos dados GNSS e tridimensionais terrestres a partir de ajustamento das observações. Testes estatísticos fornecem resultados relativos ao grau de confiança da estabilidade da rede geodésica de monitoramento e à existência ou não de deslocamentos da estrutura antrópica avaliada dentro do mesmo grau de confiança.

No caso da UHE Mauá, avalia-se a estabilidade da rede geodésica e monitoram-se os pontos à montante, chamados de MSUs, à jusante, chamados de MGEs e no interior da galeria de inspeção, chamados de EGIs, em campanhas semestrais de coleta de dados, dentro de um grau de confiança de 95%.

A integração dos resultados geodésicos, geológicos e da Engenharia Civil é estabelecida a partir de coeficientes de correlação calculados em razão de suas variáveis. Neste aspecto, avalia-se a influência de uma variável sobre a outra.

Pretende-se com esta pesquisa, a partir da utilização de métodos distintos que podem ser aplicados na obtenção de dados necessários à auscultação geodésica de barragens, combinar e interpretar estes dados de modo a proporcionar ao destinatário final os resultados necessários à sua área de atuação, para o encaminhamento das providências que lhe são cabíveis.

## 1.1 OBJETIVO

Integrar observações derivadas do monitoramento de estruturas antrópicas, efetivando análise e representação de deslocamentos, utilizando vetores e elipses de erro, a partir de um sistema computacional especialmente desenvolvido para este fim.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reduzir as coordenadas obtidas por GNSS a uma época de referência, verificando a igualdade estatística;
- Combinar os dados coletados via GNSS e obtidos por levantamentos tridimensionais terrestres, ajustando as observações pelo Método Paramétrico e Modelo Matemático de Variação de Coordenadas;
- Definir e implementar a metodologia para redução, ajuste e determinação de coordenadas;
- Verificar estatisticamente a ocorrência de deslocamentos dos pontos da rede geodésica e dos pontos monitorados.
- Integrar as modalidades de monitoramento, estabelecendo a correlação entre as diferentes modalidades de detecção de deslocamentos.
- Desenvolver um sistema computacional que possibilite a organização registro, armazenamento e recuperação dos dados, definindo os graus de automação e também os cálculos necessários para a realização dos cálculos dos e análise dos deslocamentos;
- Estabelecer na interface o método de combinação dos dados a fim de obter as coordenadas tetradimensionais  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e a variação temporal, para descrever o comportamento da estrutura antrópica ao longo do tempo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A Associação Internacional de Geodésia (IAG) é uma organização na área da Geodésia que promove a cooperação científica geodésica em escala global. É membro ativo da Associação Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG) que faz parte do Conselho Internacional para a Ciência (ICSU) (IAG, 2003).

Após a Primeira Guerra Mundial, a IAG foi reestruturada e passou a fazer parte da IUGG quando a Geodésia deixou de ser tratada isoladamente e começou uma parceria com a Geofísica. Com isso, abriu-se uma vasta possibilidade de atuação interdisciplinar, principalmente com o surgimento da era espacial (IAG, 2003).

O ICSU é o Conselho que promove atividade científica internacional nos diferentes ramos da ciência e suas aplicações para o benefício da humanidade. Este objetivo é implementado a partir da coordenação de grandes programas internacionais e interdisciplinares de atuação, através da criação de corpos interdisciplinares que realizam atividades de interesse de vários organismos-membros, e por abordar questões de interesse comum a todos os cientistas (IAG, 2003).

A atuação conjunta entre a IAG e outras associações aumentou consideravelmente após a utilização de métodos espaciais. Atualmente, é fortemente atuante junto às associações ligadas à Geofísica divididas em Sismologia e Física do Interior da Terra (IASPEI), Meteorologia e Ciências Atmosféricas (IAMAS) e Ciências Físicas dos Oceanos (IAPSO). Parte dessa interação é canalizada para estruturas organizacionais específicas em temas de interesse mútuo (IAG, 2003).

Esta cooperação é estimulada pela IUGG que promove simpósios em suas assembleias gerais onde resultados das pesquisas interdisciplinares podem ser apresentados (IAG, 2003).

No tocante às pesquisas científicas destinadas ao monitoramento de estruturas do porte de barragens no Brasil, estas são realizadas isoladamente pela Geologia, Engenharia Civil e Geodésia. Cada ciência interpreta a existência de deslocamentos e/ou deformação sob sua própria óptica, não havendo uma análise multifatorial para a ocorrência destes eventos.

No entanto, movimentações ou deslocamentos detectados pela Geodésia podem ter correlação com variações térmicas decorrentes das estações do ano e em razão da variação do volume de água do reservatório. A avaliação conjunta das diferentes fontes de observações pode oferecer respostas consistentes quanto ao comportamento dimensional da barragem.

Deste modo, a presente pesquisa visa à interpretação conjunta das observações e resultados, correlacionando as variáveis das diferentes áreas envolvidas em monitoramento de estruturas antrópicas.

Neste caso, o monitoramento geodésico combina observações obtidas por levantamentos GNSS e terrestres pelo método de poligonação, irradiação e nivelamento geométrico. As observações são submetidas a testes estatísticos que avaliam a estabilidade da rede geodésica e a movimentação dos pontos monitorados, a um grau de confiança de 95%.

As observações derivadas da Engenharia Civil que empregam instrumentação de segurança com pêndulos diretos e invertidos, extensômetros e medidores triortogonais e da Geologia, utilizando sismógrafos e sensores de deslocamentos fabricados com fibra óptica, são de responsabilidade dos profissionais ligados às respectivas áreas. Os resultados destes monitoramentos são integrados com as observações dos levantamentos geodésicos, a partir do Coeficiente de Correlação de Person, calculado em um sistema desenvolvido especialmente para este fim, no estudo de caso da UHE Mauá.

Inserida na abordagem trazida pela IAG junto ao IUGG, dentro de uma ideia de multidisciplinaridade entre as Ciências Geodésicas e demais áreas, esta pesquisa tem por escopo a integração de resultados de monitoramento de estruturas antrópicas, utilizando técnicas aplicadas nas Ciências Geodésicas, na Geologia e na Engenharia Civil para disponibilizar aos usuários de áreas distintas as informações úteis e práticas ao seu âmbito de atuação.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo será abordado um breve histórico sobre monitoramento de estruturas naturais e antrópicas, e alguns métodos de monitoramento aplicados nas Ciências Geodésicas, na Geologia e na Engenharia Civil.



## 2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE MONITORAMENTO

No âmbito acadêmico, o número de trabalhos relacionados ao monitoramento de grandes estruturas antrópicas (construídas pelo homem) vem aumentando nos últimos anos. Uma prova disso são os trabalhos desenvolvidos no grupo de pesquisa Geodésia Aplicada à Engenharia, ligado ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, no Rio Iguaçu, localizada entre os municípios de General Carneiro e Nova Prata do Iguaçu (região Sudoeste do estado do Paraná), foram desenvolvidos alguns trabalhos listados a seguir.

Zocolotti Filho (2005) realiza um estudo para desenvolvimento de metodologia utilizada no monitoramento de pontos em galerias de inspeção (no interior de barragens) empregando técnicas de poligonação de precisão, que permite analisar a estrutura de forma ampla. Tal procedimento vem complementar o monitoramento que utiliza extensômetros e pêndulos, que permitem apenas a detecção de problemas localizados ou relativos entre pontos.

Ainda em 2005, Teixeira realiza uma análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global. Neste trabalho, os resultados mostraram-se promissores, inclusive, o autor recomenda sua utilização no monitoramento de qualquer estrutura, seja ela artificial ou natural.

Granemann (2005) amplia o tema com um estudo sobre a utilização de uma rede geodésica para o monitoramento de uma barragem, no qual apresenta formas de avaliar a rigidez da rede utilizada como referência para demais monitoramentos realizados no local.

Outro trabalho que trouxe inovações na forma de realizar o controle de deslocamentos é apresentado por Martini (2005), que aborda a calibração e utilização de prismas de reflexão total confeccionados em fita adesiva.

A gravimetria também é alvo de estudo quando se trata de deslocamentos em regiões de barragens. Gagg (2007) apresenta uma análise qualitativa e estatística de resultados obtidos na UHE Governador Bento Munhoz da Rocha, uma usina considerada potencialmente sismogênica por possuir 160m de altura.

Em 2008, Neves realiza um estudo na UHE Salto Caxias sobre o processamento e análise dos levantamentos geodésicos aplicados ao monitoramento de estruturas, no qual são realizadas análises da rede geodésica de referência e de pontos implantados junto a algumas fissuras no corpo da barragem, com intuito de verificar se houve deslocamentos destes pontos.

Nadal (2008) desenvolve um sistema de controle e operação remota de estações totais robotizadas voltado à auscultação geodésica e Palazzo (2008) demonstra o monitoramento dinâmico de pontes utilizando uma estação total robotizada associada a uma rede geodésica de referência, o que proporciona aquisição autônoma de dados, reconhecimento automático de alvos, maior quantidade de dados coletados em menor espaço de tempo, entre outros.

Santibañez (2010) avalia a influência do modelo de ajustamentos de observações e a densidade de pontos coletados utilizando *laser scanner* terrestre para representação de superfícies planas na detecção de deslocamentos de estruturas.

No trabalho desenvolvido por Suci (2012), é realizado um estudo sobre a estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias, utilizando dados GNSS e avaliando os deslocamentos através do Teste de Congruência Global.

Na UHE de Mauá descrita neste trabalho são desenvolvidos os seguintes estudos: Silva (2012) avalia a utilização do método de nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, na determinação de recalque em estruturas, no qual são encontrados valores menores que o recalque admissível para a estrutura avaliada.

Muguio (2012) implanta uma estação de monitoramento contínuo GNSS em um ponto da barragem, possibilitando acompanhar o comportamento desde a fase de formação do reservatório.

Siguel (2013) aplica o método de irradiação topográfica tridimensional com a finalidade de verificar a estabilidade de pontos da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá.

Na Universidade de São Paulo (USP), Ribeiro (2008) propõe um método para verificação da estabilidade dos pilares de redes para o monitoramento geodésico de barragens, utilizando o sistema de posicionamento por GPS. Os dados são ajustados aplicando o Teste de Congruência Global para verificação estatística dos resultados obtidos.

Ainda na USP, deslocamentos em redes geodésicas são alvos de estudo na dissertação apresentada por Fazan (2010), na qual ele utiliza o sistema GNSS para determinar as coordenadas dos pontos e o Teste de Congruência Global e Análise Geométrica para detectar tais deslocamentos na UHE de Itaipu.

Internacionalmente, Fernández *et al* (1999), realizam um estudo para determinar a melhor técnica de levantamento geodésico para monitoramento de atividades vulcânicas. A área escolhida é um vulcão em Tenerife, nas Ilhas Canárias. A análise considera a estrutura crustal da área, a geologia e a atividade vulcânica conhecida para estimar as deformações e as alterações da gravidade que podem acontecer momentos antes de ocorrerem as erupções. O modelo de deformação utilizado inclui o campo da gravidade conhecido e variações verticais na crosta.

Andrianova (2008) fala da importância de se monitorar possíveis deslocamentos já no momento da execução de obras, com o aumento da complexidade dos edifícios e estruturas em construção. Essa complexidade ocorre devido ao aumento do número de andares e à profundidade da porção subterrânea destas construções. Este autor descreve também um procedimento para a realização do monitoramento geodésico de alta precisão aplicado à construção civil com objetivo de garantir a segurança e preservação destas estruturas. Como estudo de caso, apresenta o monitoramento durante a construção de um muro de retenção em Moscou.

Abordando as técnicas GPS, GAO *et al* (2011), na China, apresentam proposta de monitoramento de deformação de superfícies em minas utilizando o

método de GPS-RTK<sup>2</sup>, com a redução do efeito do multicaminho, utilizando frequência das observações de 20 Hz em curtos períodos de tempo de aproximadamente 30 segundos.

Na Espanha, Constantino e Angelini (2011) investigam um fenômeno de subsidência em várias áreas urbanas causado pela mineração de uma mina de sal, localizada na região de Bages, na Catalunha, conhecida como *Conca Potàsica*. Além da subsidência natural, ocorrida pela dissolução do potássio e do magnésio encontrados no local, a mineração superficial e subterrânea contínua realizada pelas empresas mineradoras acelera o processo. Na segunda metade do século XX foram registradas deformações de aproximadamente 1m na região.

O estudo realizado pelas pesquisadoras utiliza uma rede geodésica monitorada utilizando equipamentos GPS para detectar eventuais deformações da região mencionada. A análise estatística da posição de 36 pontos distribuídos em toda a região mostra a ocorrência de variações significativas em 8 deles, na área geologicamente instável da *Conca Potàsica*.

Cranenbroeck (2011) apresenta em seu trabalho o estado da arte em monitoramento geodésico de estruturas utilizando levantamento com estação total e GNSS, no qual destaca a importância de analisar a tendência dos deslocamentos ao longo do tempo. Não se pode concluir que há deslocamentos, analisando os pontos isoladamente, pois estão sujeitos a variações térmicas e de nível de água de cada reservatório. Para o autor, um sistema de monitoramento ajuda a reduzir os riscos e o custo de manutenção, porque há possibilidade de detectar e reagir antes da ocorrência de falhas catastróficas que podem causar perdas financeiras significativas, ferimentos e até mortes.

A partir deste breve histórico, pode-se perceber a preocupação da comunidade acadêmica em relação ao monitoramento de estruturas naturais ou antrópicas que podem oferecer algum risco à população. Os estudos referem-se tanto

---

<sup>2</sup> O sistema RTK (Real Time Kinematic) consiste em um posicionamento relativo cinemático em tempo real que dispensa a necessidade de pós-processamento de dados, pois alia a tecnologia de navegação por satélites a um rádio-modem ou a um telefone GSM para obter correções instantâneas. (Maiores informações, recomenda-se MONICO, 2008).

à observância de deslocamentos dos pontos das estruturas quanto à deformação da própria rede geodésica.

Desenvolvendo ou aprimorando estudos neste âmbito, o acompanhamento das estruturas é a contribuição que a ciência oferece para o benefício da humanidade. No próximo item, detalha-se a rede geodésica utilizada como referência para o monitoramento da UHE Mauá, aplicando as técnicas geodésicas pertinentes ao estudo.

## 2.2 REDE GEODÉSICA

Segundo U.S. Army (1994), os pontos da rede geodésica devem ter suas posições controladas porque são utilizados como referência para a medição de deslocamentos de pontos posicionados no corpo da estrutura monitorada. Para obter maiores informações sobre a construção dos pilares que compõem a Rede Geodésica da UHE Mauá, recomenda-se Siguel (2013).

A partir da utilização dos sistemas globais de navegação por satélite (Global Navigation Satellite Systems – GNSS), a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos da rede geodésica tornou-se direta, muitas vezes, tomando o lugar dos métodos planimétricos e altimétricos realizados separadamente. A facilidade na execução do levantamento, quando comparado com outras técnicas, tornou-o bastante atrativo.

Porém, quando se trabalha com dados oriundos de levantamento GNSS, é preciso atentar para a movimentação das placas litosféricas sobre as quais os pontos levantados estão posicionados. Para possibilitar a correção da posição destes pontos em relação àquela movimentação, deve-se determinar uma época de referência na qual as coordenadas estarão relacionadas (SUCI, 2012).

### 2.2.1 Redução das coordenadas

Na determinação de deslocamentos de uma rede geodésica, há a necessidade de reduzir as coordenadas determinadas na época do rastreo para uma época de referência, aqui chamada de época 1. Esta redução é necessária para evitar uma interpretação de que os pontos monitorados estão se movimentando, quando na verdade não estão.

Partindo do pressuposto que os pontos da rede de monitoramento e os pontos monitorados encontram-se situados sobre a mesma placa litosférica, pode-se pensar na irrelevância do movimento das placas, porque estas e os pontos movem-se conjuntamente. Assim, esta movimentação em nada interferiria na verificação de deslocamentos locais.

Porém, como a técnica utilizada para a determinação das coordenadas dos pontos da rede é pelo sistema GNSS, verificam-se deslocamentos dos pontos da rede em relação ao sistema de referência. Isto corresponde a um resultado indesejado, porque o objetivo é analisar o grau de confiança da estabilidade da rede e a possibilidade de deslocamento de pontos de monitoramento em relação à rede geodésica.

Logo, as coordenadas levantadas por GNSS devem ser reduzidas a uma determinada época, considerando o movimento sofrido pela placa litosférica. Assim, a análise dos deslocamentos locais sofridos (ou não) pelo ponto monitorado resulta apenas em relação à rede de monitoramento.

A partir do levantamento dos pilares por sistema GNSS, obtêm-se as suas coordenadas. Processando os dados GNSS com alta precisão, é necessário corrigir as coordenadas fornecidas para as estações RBMC<sup>3</sup> para a data da observação, levando-se em conta o movimento tectônico de placas.

---

<sup>3</sup> As estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de coordenadas conhecidas pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), eliminando a necessidade de que o usuário imobilize um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. Além disso, os receptores que equipam as estações da RBMC são de alto desempenho, proporcionando

A correção torna-se possível a partir do campo de velocidade da placa litosférica à qual pertence a estação de rastreamento cuja correção é almejada. O modelo oficial adotado pelo SIRGAS e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o Modelo de Velocidades para a América do Sul e Caribe (VEMOS2009).

A partir do campo de velocidades das estações SIRGAS-COM, ou seja, estações de monitoramento contínuo da Rede SIRGAS, denominadas pelo IGS Regional Network Associate Analysis Centre of SIRGAS (IGS RNAAC SIR) e a partir das coordenadas das campanhas SIRGAS95 e SIRGAS2000, foi desenvolvido o modelo VEMOS2009 (DREWES e HEIDBACH, 2009), cujo aplicativo VMS2009 está disponível no sítio do SIRGAS na internet. Assim, determina-se o campo de velocidade das estações com base em seus movimentos na placa tectônica da América do Sul, conforme o QUADRO 2.

Estação	Campo de velocidade em X (m/ano)	Campo de velocidade em Y (m/ano)	Campo de velocidade em Z (m/ano)
Guarapuava	0,0014	- 0,0055	0,0109
Maringá	0,0010	- 0,0053	0,0111
UFPR	0,0012	- 0,0058	0,0108
PG02	0,0011	- 0,0055	0,0110

QUADRO 2 - CAMPO DE VELOCIDADES OBTIDO COM O VEMOS2009  
FONTE: O AUTOR

Os cálculos para atualização das coordenadas estão descritos na dissertação de mestrado de Suci (2012) referindo-se à rede geodésica de monitoramento da UHE Governador José Richa (Salto Caxias), município de Capitão Leônidas Marques, Paraná. Assim, é possível obter inicialmente as coordenadas dos vértices no instante da observação e posteriormente reduzi-las a uma data convencional para futuras análises.

---

observações de grande qualidade e confiabilidade. Os dados são disponibilizados pelo IBGE, mantenedor do projeto RBMC (IBGE, 2015).

Quando se determinam coordenadas geodésicas a partir de técnicas espaciais, no processamento de dados GNSS, utilizam-se efemérides transmitidas em tempo real referenciadas ao WGS84 (G1150), efemérides rápidas preditas e efemérides finais, estas referenciadas ao ITRFyy, em que yy corresponde ao ano de realização do sistema.

No presente caso, as efemérides precisas (rápidas preditas ou finais), são referenciadas ao ITRF2008. Aplica-se a Transformada Generalizada de Helmert (TGH), adequando as coordenadas ao ITRF2000 (SIRGAS2000).

A Equação 1, apresentada por Leick (2004) e Monico (2008) traz a Transformação Generalizada de Helmert.

$$\begin{aligned} \vec{X}_{B(t)} = \vec{T} + (1 + s)[\varepsilon + I][\vec{X}_{A(t_0)} + \vec{V}_{A(t_0)}(t - t_0)] + \\ \left[ \dot{\vec{T}} + [(1 + s)\dot{\varepsilon} + \dot{s}[\varepsilon + I]]\vec{X}_{A(t_0)} \right] (t - t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

$\vec{X}_{B(t)}$  é o vetor com as coordenadas de um dado ponto P no sistema de referência B na época t;

$\vec{T}$  representa o vetor da translação necessária que faz com que os referenciais A e B coincidam;

$s$  é o fator diferencial de escala entre os dois sistemas;

$\varepsilon$  é a matriz de rotação (em radianos) em torno do sistema cartesiano XYZ no referencial A que estabelece paralelismo com o referencial B na época  $t_0$ ;

$\vec{V}_{A(t_0)}$  representa o vetor das velocidades da estação a ser transformada. Tais velocidades, no presente trabalho são retiradas do modelo VEMOS2009;

$(t - t_0)$  é o intervalo de tempo, em anos, decorrido entre a realização do sistema de referência A ( $t_0$ ) e a época do rastreamento (t);

$\dot{\vec{T}}$ ,  $\dot{\varepsilon}$  e  $\dot{s}$  são as variações temporais da translação, rotação e escala respectivamente.

Para maiores detalhes sobre este assunto, ver Suci (2012).



### 2.2.2 Teste estatístico

Para avaliar, a partir de um determinado nível de confiança, se as diferenças entre os valores das coordenadas determinadas em épocas distintas são estatisticamente significativas ou não, deve-se realizar um teste formulando as hipóteses a serem testadas.

No teste estatístico, a função densidade de probabilidade, expressa pela média e variância, deve ser conhecida ou derivada dos dados experimentais para o caso da hipótese  $H_0$  ser verdadeira. Como não se trabalha com toda a população, mas apenas com amostras, deve-se tomar a decisão dentro de um grau de confiança. Quanto menor o grau de confiança, menor a credibilidade atribuída à hipótese nula. Se a confiabilidade é suficientemente baixa, a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada. Caso contrário, se a probabilidade não é pequena a ponto de reduzir a credibilidade na hipótese nula,  $H_0$  deve ser aceito (KUANG, 1996).

Quando se realiza um teste de hipóteses, deve-se tomar cuidado quanto aos erros cometidos ao aceitar ou rejeitar as hipóteses  $H_0$ . São eles:

- Erro tipo I, quando se rejeita  $H_0$  quando ela é verdadeira;
- Erro tipo II, quando se aceita  $H_0$  quando ela é falsa.

A probabilidade de cometer o erro do tipo I é chamada de nível de significância  $\alpha$  e a probabilidade de tomar a decisão correta chama-se grau de confiança  $(1-\alpha)$ . A probabilidade de cometer o erro do tipo II é chamada de  $\beta$  e a probabilidade de tomar a decisão correta chama-se de “poder” ou “força” do teste  $(1-\beta)$  (KUANG, 1996).

A escolha do nível de significância  $\alpha$  é um critério subjetivo e, em Geodésia, usualmente os valores ficam entre 0,001 e 0,05. O menor nível de significância expressa a maior relutância para rejeitar  $H_0$  injustamente. No entanto, se a hipótese nula é falsa haverá o erro do Tipo II (KUANG, 1996).

Segundo Monico (1988), para a verificação da igualdade estatística das coordenadas em diferentes épocas, formulam-se os testes admitindo a igualdade das coordenadas ou postulando uma hipótese em que as diferenças entre coordenadas variam em um determinado intervalo, antes de contribuir para a inferência estatística. O primeiro não reflete a realidade, porque as coordenadas diferem em razão dos erros de observação. O segundo deve estabelecer um intervalo inferior ao resultante dos desvios-padrão médios das observações.

A hipótese testada utiliza cada coordenada tridimensional (x, y e z) destes pontos em duas épocas, onde a época de referência é a “1” e a época de estudo é a “m”. Assim:

$$H_0 : X_1 - X_m = 0 \quad (2)$$

$$H_1 : X_1 - X_m \neq 0 \quad (3)$$

O critério do teste é dado por Guerra e Donaire (1991):

$$T = \frac{X_m - X_1}{\sqrt{s^2 \left( \frac{1}{n_{xm}} + \frac{1}{n_{x1}} \right)}} \quad (4)$$

Onde:

$$s^2 = \frac{(n_{xm} - 1) \cdot s_{xm}^2 + (n_{x1} - 1) \cdot s_{x1}^2}{n_x + n_{x1} - 2}$$

$X_m$  = Coordenada do ponto na época de estudo

$X_1$  = Coordenada do ponto na época de referência

$n_{xm}$  = Número de séries na época de estudo

$n_{x1}$  = Número de séries na época de referência

$s_{xm}^2$  = Variância da coordenada na época de estudo

$s_{x1}^2$  = Variância da coordenada na época de referência

Se a hipótese  $H_0$  é aceita, os pontos da rede são estatisticamente iguais entre as épocas 1 e m, e podem ser considerados fixos, dentro do grau de confiança atribuído de 95%. Se a hipótese  $H_0$  é rejeitada, as coordenadas são diferentes estatisticamente nas duas épocas. Neste caso, devem ser utilizadas as coordenadas da rede obtidas na época m para a verificação de deslocamentos dos pontos monitorados.

Para detectar os deslocamentos de um ponto de monitoramento “k”, considerando duas épocas associadas à matriz variância-covariância  $\Sigma k$ , utilizam-se as seguintes equações (MONICO, 1988):

$$\Delta x^k = x_{i+1}^k - x_i^k \quad (5)$$

$$\Delta y^k = y_{i+1}^k - y_i^k \quad (6)$$

$$\Delta z^k = z_{i+1}^k - z_i^k \quad (7)$$

E o deslocamento é calculado por:

$$\Delta k = \sqrt{(\Delta x^k)^2 + (\Delta y^k)^2 + (\Delta z^k)^2} \quad (8)$$

Para calcular a variância do deslocamento, aplicando a lei da propagação de covariâncias, utiliza-se:

$$\sigma^2 \Delta k = \frac{1}{\Delta k^2} \cdot [\Delta x^k, \Delta y^k, \Delta z^k] \cdot \Sigma k \cdot [\Delta x^k, \Delta y^k, \Delta z^k]^t \quad (9)$$

As hipóteses testadas são:

$$H_0 : \Delta k = 0 \quad (10)$$

$$H_1 : \Delta k \neq 0 \quad (11)$$

E o critério do teste é a expressão a seguir, que é denominada de deslocamento padronizado sempre que  $\Delta k$  for igual a zero. A expressão possui distribuição t de Student.

$$T = \frac{(\Delta k - \Delta k_0)}{\sigma \Delta k} \quad (12)$$

A hipótese  $H_0$  (10) é rejeitada se:

$$|T| > t_{(n-q), \alpha} \quad (13)$$

Neste caso, se  $H_0$  é aceito no teste de hipótese para verificação dos pilares da rede geodésica e rejeitado no caso do teste dos pontos monitorados, isso quer dizer que estes se deslocaram em relação àqueles, dentro de um grau de confiança de 95%.

Para maiores detalhes sobre testes estatísticos, consultar Kuang 1996, Ghilani, 2010.

Após a análise estatística das coordenadas em épocas diferentes, é necessária a transformação para um sistema de referência local, chamado de sistema de barragem para facilitar o entendimento e a interpretação das coordenadas oriundas dos levantamentos. Esta transformação é explicada no próximo item.

### 2.2.3 Transformação para o Sistema de Barragem

Em Ciências Geodésicas, são muitos os referenciais utilizados, o que implica a necessidade da transformação de coordenadas de um para outro. Por conveniência, pode-se utilizar de um Sistema Geodésico Cartesiano Local (SGCL) partindo de coordenadas no Sistema Geodésico Cartesiano (SGC) (ANDRADE, 1988).

Para a transformação, parte-se de um Sistema Geodésico Cartesiano cuja figura geométrica denominada elipsóide de revolução é utilizada para defini-lo. Este referencial consiste em um sistema dextrogiro de eixos triortogonais, com origem no centro de massa da Terra, sendo que o eixo X está contido no plano equatorial e apontado positivamente para o meridiano de Greenwich (longitude  $0^\circ$ ), o eixo Y também contido no plano do equador formando um ângulo de  $90^\circ$  com o anterior e o eixo Z paralelo ao o eixo de rotação da Terra e orientado positivamente na direção Norte.

O elipsóide de revolução, atuando como figura geométrica da Terra, é usado para as técnicas de posicionamento global atuais, a partir da Latitude ( $\phi$ ), Longitude ( $\lambda$ ) e altitude ( $h$ ). Dentre as técnicas de densificação de pontos nesta superfície destaca-se o posicionamento por GNSS (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Na transformação de coordenadas de um referencial para outro pode-se utilizar de um Sistema Geodésico Cartesiano Local (SGCL) partindo de coordenadas no SGC. Caracteriza-se um SGCL (topocêntrico) de forma que o eixo "ZI" coincida com a normal que contenha o ponto definido como origem local. O eixo "YI" é ortogonal a "ZI" e positivo na direção norte e que por sua vez é definido pela direção do meridiano do ponto origem. O eixo "XI" é ortogonal aos demais, sendo positivo na direção leste (JEKELI, 2006).

Assim, fica estabelecido um sistema de referência local dextrogiro, vinculado a um referencial geodésico (FIGURA 1)

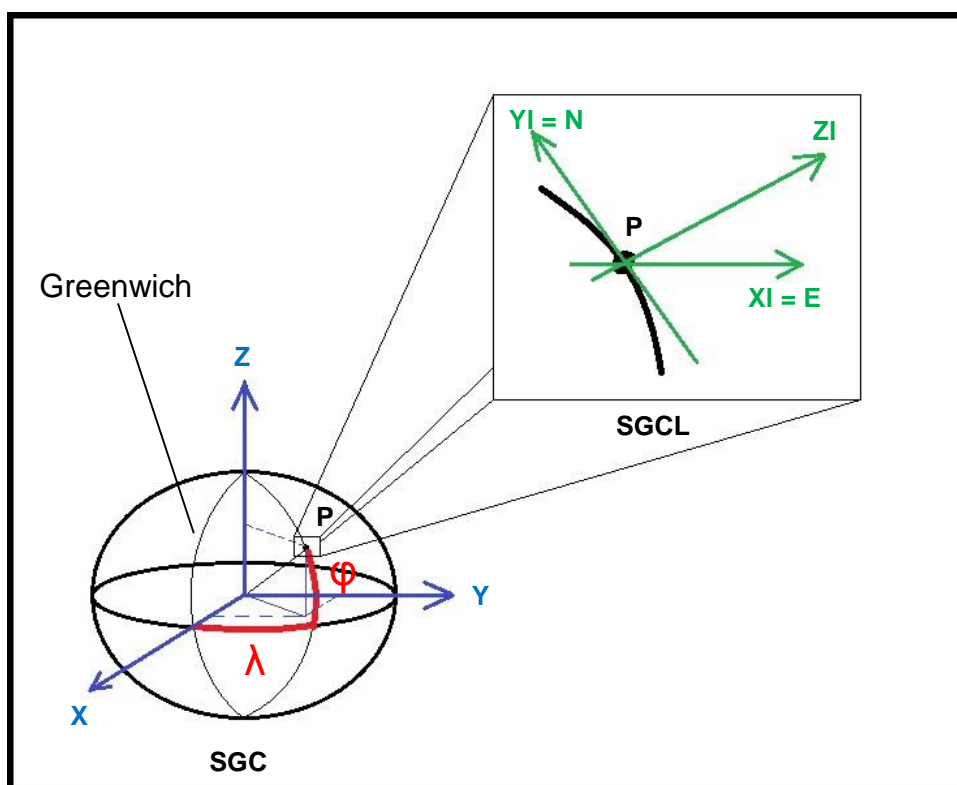


FIGURA 1 - REFERENCIAL GEODÉSICO, GEOD. CARTESIANO E GEOD. CART. LOCAL  
 FONTE: O AUTOR

Com o objetivo de facilitar o entendimento e a interpretação das coordenadas oriundas dos levantamentos no entorno da barragem, é estabelecido um Sistema de Barragem (SB) sendo um referencial cartesiano local com um eixo no sentido longitudinal da estrutura com orientação positiva na direção da margem direita “XB”, o eixo perpendicular a este e orientação positiva no sentido do fluxo do rio (montante para jusante) “YB” e o eixo “ZB” completando o terno do sistema dextrogiro.

Na FIGURA 2, o Sistema Geodésico Local está caracterizado pelos eixos  $YI = N$  e  $XI = E$ , e o Sistema da Barragem – SB, pelos eixos XB e YB.

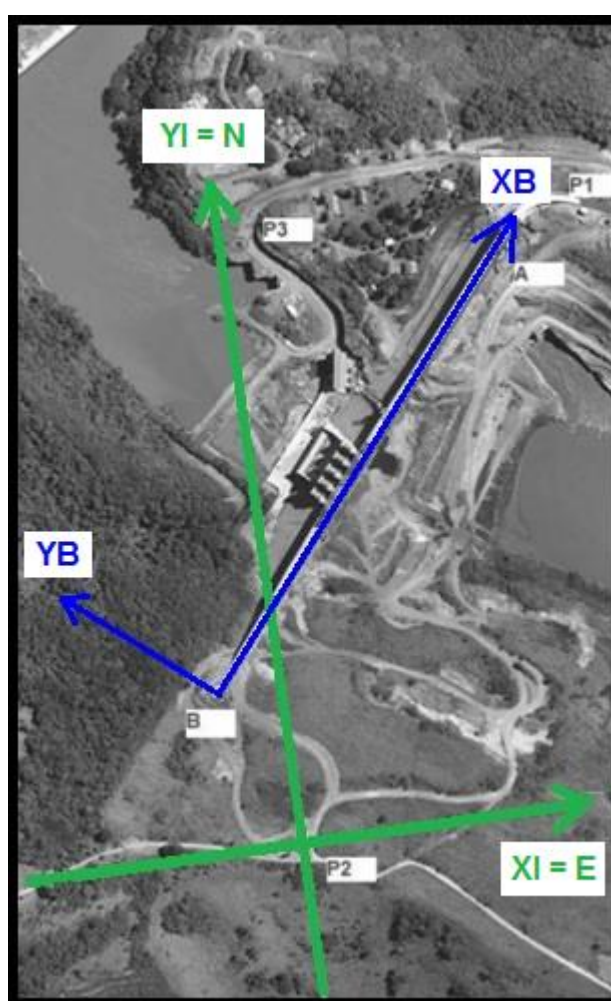


FIGURA 2 - SISTEMA GEODÉSICO LOCAL E O SISTEMA DA BARRAGEM  
FONTE: O AUTOR

Para possibilitar a determinação dos parâmetros de transformação entre referenciais quando se trabalha com referencial local, há necessidade do conhecimento de parâmetros de transformações geométricas ou, em alguns casos, o

conhecimento de coordenadas de pontos homólogos (mesmos pontos nos dois referenciais) para a determinação destes parâmetros.

No presente estudo, para determinar os parâmetros de transformação adota-se como pontos homólogos, três pilares de centragem forçada que compõem a rede geodésica fundamental da área e para definir o alinhamento longitudinal (eixo "XB" do sistema a ser implantado) são arbitradas as coordenadas de dois pontos de monitoramento fixados sobre a crista barragem, uma vez que não há interesse em materializar tal alinhamento.

A cada campanha de levantamento (no mínimo duas vezes por ano) são realizadas determinações de suas coordenadas geodésicas ( $\varphi, \lambda, h$ ) utilizando dados GNSS e técnicas geodésicas de triangulação e trilateração.

Para determinar estas coordenadas no sistema de referência a ser criado, é necessário tomar as coordenadas geodésicas dos 5 pontos mencionados (os três pilares ou pontos homólogos e os dois pontos sobre a barragem que definem o eixo "x"), e transformá-las em coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais através da Equação 14:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ (N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

- X,Y,Z - são as coordenadas Geodésicas Cartesianas

-  $\varphi, \lambda, h$  - são latitude, longitude e altitude geodésicas

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi)^{1/2}} \quad (15)$$

a - Semi eixo maior do elipsóide

$e^2 = 2f - f^2$  - Primeira excentricidade ao quadrado

$f = \frac{a-b}{a}$  - Achatamento do elipsóide

b - Semi eixo menor do elipsóide

Uma vez obtidas as coordenadas no SGC, adota-se o pilar PG02 como origem do sistema SGCL, pelo fato deste marco geodésico localizar-se fora da influência de linhas de transmissão de energia elétrica, que podem interferir no rastreo GNSS. As coordenadas neste sistema são calculadas através das equações apresentadas a seguir:

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = M1.M3. \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sendo:

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 \\ 0 & -\cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$M3 = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\cos\lambda_0 & -\sin\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Tem-se:

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 \\ 0 & -\cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\cos\lambda_0 & -\sin\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde:

$X_I, Y_I, Z_I$  - coordenadas no SGCL;

$\varphi_0, \lambda_0$  - latitude e longitude geodésica do ponto origem;

$X, Y, Z$  - coordenadas geodésicas cartesianas do ponto a ser transformado;

$X_0, Y_0, Z_0$  - coordenadas geodésicas cartesianas do ponto origem.

Finalmente para transformar tais coordenadas para o sistema da barragem, aplica-se o seguinte modelo matemático:



$$\begin{bmatrix} XB \\ YB \\ ZB \end{bmatrix} = R^{-1} \cdot \begin{bmatrix} XI - XI_0 \\ YI - YI_0 \\ ZI - ZI_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\theta = \frac{y-y_0}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} \quad (22)$$

Onde:

XB, YB e ZB - coordenadas no sistema da barragem;

$\theta$  - ângulo de rotação entre os sistemas;

$XI_0$ ,  $YI_0$  e  $ZI_0$  - coordenadas do ponto origem no SGCL;

XI, YI, e ZI - coordenadas no SGCL do ponto a ser transformado.

Ressalte-se que este modelo realiza uma transformação ponto a ponto de um sistema a outro. É possível deduzir das novas coordenadas obtidas quais foram as translações de uma origem a outra, bem como a rotação sofrida, possibilitando a transformação de pontos quaisquer.

A fim de verificar tais grandezas, procede-se o cálculo dos parâmetros por meio de um ajustamento pelo Método Paramétrico, conforme descrito por Gemael (2004), a partir de uma Transformação de Similaridade, também chamada de Isogonal ou Conforme (LUGNANI,1987), empregando-se o modelo de Helmert descrito a seguir:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = S \cdot W \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (23)$$

Sendo:

$$W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Onde:

$(u,v,w)$  e  $(x,y,z)$  são os valores das coordenadas de um ponto conhecido em dois sistemas;

$S$  – escala;

$(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  - translações em cada eixo;

$r(i,j)$  corresponde aos elementos de uma matriz de rotação;

sendo:

$$r_{11} = \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa);$$

$$r_{12} = \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa);$$

$$r_{13} = \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa);$$

$$r_{21} = -\cos(\varphi) \cdot \sin(\kappa);$$

$$r_{22} = \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa)$$

$$r_{23} = \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa)$$

$$r_{31} = \sin(\varphi);$$

$$r_{32} = -\sin(\omega) \cdot \cos(\varphi);$$

$$r_{33} = \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi);$$

onde:

$\kappa$  = ângulo de rotação no eixo Z;

$\varphi$  = ângulo de rotação no eixo Y;

$\omega$  = ângulo de rotação no eixo X.

De posse dos parâmetros de transformação, é possível obter as coordenadas em qualquer um dos sistemas descritos anteriormente.

## 2.2.4 Detecção de *outliers* e ajustamento da rede geodésica

### 2.2.4.1 Critérios para minimização de erros sistemáticos e detecção e minimização de *outliers*

Para o levantamento da rede geodésica com estação total, utilizam-se técnicas de triangulação e trilateração. A triangulação é a medição de direções que formam figuras geométricas a partir de triângulos que têm os pontos da rede como vértice. Já na trilateração, os triângulos são formados a partir da medida das distâncias entre os pontos.

As grandezas fundamentais de todas as observações efetuadas em Topografia são as medidas de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias, que podem ser obtidas tanto por métodos diretos quanto indiretos. Pelo método direto, a observação é processada diretamente sobre a grandeza procurada, comparando-a com um valor padrão.

Já pelo método indireto, podem-se utilizar o tempo e a velocidade de propagação da onda eletromagnética aliados a modelos matemáticos que consideram tais informações e calculam o valor da distância almejada (GHILANI, WOLF, 2012).

Quando se utilizam os MED, o método de obtenção de medidas de distância é indireto. Logo, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e a temperatura afetam a grandeza calculada porque influem no índice de refração e alteram o comprimento da onda eletromagnética (GHILANI, WOLF, 2012). São chamados de erros naturais e não podem ser desprezados nos cálculos para a determinação da distância entre o emissor e o alvo.

Estes efeitos podem ser corrigidos com a utilização de ábacos ou fórmulas que acompanham o manual do equipamento ou ainda por fórmulas adotadas pela UGGI (União Geodésica e Geofísica Internacional). Mais detalhes sobre medidores eletrônicos de distância, recomenda-se Faggion (2001) e Da Cruz (2010).

Para corrigir as distâncias medidas utilizando a Estação Total Leica TS15, por exemplo, utiliza-se a seguinte fórmula (LEICA, 2011):

$$\Delta D_1 = 286,34 - \left( \frac{0,29195 \cdot p}{1 + \alpha \cdot t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{1 + \alpha \cdot t} \cdot 10^x \right) \quad (25)$$

onde:

$$x = \left( \frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t} \right) + 0,07857 \quad (26)$$

$\Delta D_1$  : Correção atmosférica em ppm;

$p$  : Pressão atmosférica em mbar;

$t$  : Temperatura ambiente em °C;

$h$  : Umidade relativa do ar em porcentagem;

$\alpha = 1/273,15$ .

As alturas da estação total, do prisma e da base (definida pelo seu nivelamento), influenciam diretamente nas medidas dos ângulos verticais e distâncias inclinadas. Como as coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z) dos pontos observados dependem destes ângulos, foi estabelecido para este projeto, um procedimento para fixar tais alturas, com fins de obter mais um elemento de controle considerado no ajustamento de observações. A metodologia está descrita no item 3.2.1.

Para a detecção de *outliers* (diferenças além do limite aceitável para cada trabalho) nas leituras, verificam-se os pares conjugados, ou seja, se a distância medida em Posição Direta (PD) é igual à medida em Posição Inversa (PI). Caso sejam diferentes, além de um valor admissível que corresponde a “n” vezes o desvio padrão calculado, são descartadas. Se forem iguais, são mantidas.

No caso das direções horizontais, estas devem diferir de 180° em PD e PI e, para os ângulos verticais, a leitura em PD deve ser igual a 360° menos a leitura em PI. Semelhante às distâncias, se a diferença entre elas ficar fora de um limite desejável pré-estabelecido, as duas leituras são descartadas, caso contrário, obtém-se o valor da direção horizontal através da equação 27:

$$L_{Hz} = \frac{PD+PI}{2} \pm 90^\circ \quad (27)$$

Somam-se  $90^\circ$ , se PD for maior que PI, e subtraem-se  $90^\circ$ , se PD for menor que PI. Os ângulos verticais são obtidos aplicando-se a equação 28, desde que obedecem a diferença entre a posição direta (PD) e a posição invertida (PI), citada no parágrafo anterior.

$$L_V = \frac{360^\circ + PD - PI}{2} \quad (28)$$

Em seguida, calcula-se a média e o desvio padrão das leituras de distância, das direções horizontais e dos ângulos verticais e realiza-se uma verificação se estes valores estão diferentes da média. Analogamente à etapa anterior, se estiverem fora da tolerância estabelecida, são descartados.

#### 2.2.4.2 Obtenção das coordenadas da rede

Esta pesquisa combina observações espaciais e terrestres obtidas pelos levantamentos GNSS, Estação Total e Nível Geodésico Digital. Para realizar uma das etapas desta combinação, ajustam-se as observações pelo Método Paramétrico utilizando o modelo matemático funcional de Variação de Coordenadas.

Este modelo matemático é uma aplicação do Método Paramétrico para correções das coordenadas provisórias obtidas pelas observações não ajustadas. Difere do Método dos Correlatos que ajusta as observações, uma vez que as coordenadas finais dos vértices são obtidas no próprio ajustamento. Pode ser utilizado, inclusive, para ajustamento de redes livres, ou seja, aquelas que não possuem nenhum ponto de controle fixo ou injuncionado.

Segundo Gemaél (2004), o processo pode ser dividido em problema direto, cujas coordenadas iniciais ou provisórias são determinadas empregando o transporte de coordenadas a partir de medidas observadas e problema inverso, cujos ângulos e distâncias são calculados a partir das coordenadas provisórias.

Recomendam-se as seguintes literaturas: Wolf (1980), Moraes (1997), Ghilani (2002) e Gemaël (2004) para maiores detalhes sobre o assunto.

A combinação das observações dos levantamentos com receptores GNSS, Estação Total e Nível Digital deve ser precedida das seguintes fases:

- processamento das observações GNSS para obtenção das coordenadas dos vértices da rede;
- redução das coordenadas dos vértices à uma época de referência e transformação de referencial para o Sistema da Barragem;
- nivelamento geométrico, pelo método das visadas iguais, para obtenção do desnível entre PG01 e PG02, com precisão melhor que  $1\text{mm}\sqrt{k}$ , onde  $k$  é a média das distâncias nivelada e contranivelada, em quilômetros;
- trilateração e triangulação geodésica para obtenção das distâncias inclinadas, ângulos verticais e direções horizontais entre os vértices da rede, utilizados no ajustamento como observações.

Somente a partir do pilar PG02 é possível visar todos os pontos da rede geodésica utilizada. Por isso, este é considerado como ponto fixo e suas coordenadas são injuncionadas por uma técnica chamada de injunção absoluta que, segundo Dalmolin (2002), é definida quando se fixam os valores das coordenadas dos pontos durante o ajustamento ou quando se atribui um peso excessivamente grande a estas variáveis.

A seguir, apresenta-se o modelo matemático para ajuste das observações obtidas com nível digital, estação total e coordenadas aproximadas dos pontos obtidas a partir do rastreamento GNSS. Para calcular a distância tridimensional entre os pontos “i” e “j”, utiliza-se:

$$D_{ij} = \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2} \quad (29)$$

e

$$\Delta x_{ij} = x_j - x_i \quad (30)$$

$$\Delta y_{ij} = y_j - y_i \quad (31)$$

$$\Delta z_{ij} = z_j - z_i \quad (32)$$

onde:

$D_{ij}$  : Distância entre os pontos “i” e “j”;

$\Delta x_{ij}$  : Diferença entre as coordenadas X dos pontos “i” e “j”;

$\Delta y_{ij}$  : Diferença entre as coordenadas Y dos pontos “i” e “j”;

$\Delta z_{ij}$  : Diferença entre as coordenadas Z dos pontos “i” e “j”.

Como a distância inclinada é medida do centro eletrônico da estação total até o centro do prisma, retira-se do desnível a altura do instrumento e a altura do sinal:

$$\Delta z_{ij} = z_j - z_i + h_s - h_i \quad (33)$$

Assim, aplicando as equações 30, 31 e 32 em 29, tem-se:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i + h_s - h_i)^2} \quad (34)$$

Para utilizar as observações dos ângulos horizontais, aplica-se o conceito de Azimute, calculando-se:

$$Az_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta x_{ij}}{\Delta y_{ij}} \right) \quad (35)$$

Aplicando 30 e 31 em 35, tem-se:

$$Az_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{x_j - x_i}{y_j - y_i} \right) \quad (36)$$

Na FIGURA 3 observa-se a aplicação dos azimutes no cálculo dos ângulos horizontais.

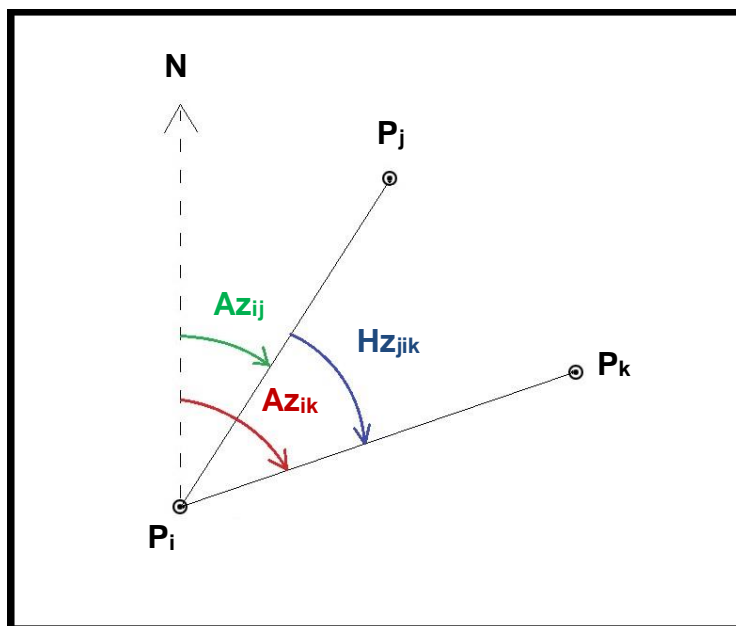


FIGURA 3 - CÁLCULO DO ÂNGULO HORIZONTAL A PARTIR DE DOIS AZIMUTES  
FONTE: O AUTOR

Então, adicionando-se o Azimute ao ponto “k”, tem-se o ângulo horizontal “jik”.

$$Hz_{jik} = Az_{ik} - Az_{ij} \quad (37)$$

E, aplicando 36 em 37, tem-se:

$$Hz_{jik} = \tan^{-1} \left( \frac{x_k - x_i}{y_k - y_i} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{x_j - x_i}{y_j - y_i} \right) \quad (38)$$

Sendo o ponto “i” onde está estacionado o equipamento, e os pontos “j” e “k” as visadas de ré e vante respectivamente.

Finalmente, para os ângulos Zenitais:

$$\Delta z_{ij} = Di \cdot \cos Z + hi - hs \quad (39)$$

onde:

$\Delta z_{ij}$  : Desnível;

$Di$  : Distância inclinada;

$Z$  : Ângulo Zenital;



$hi$  : Altura do instrumento;

$hs$  : Altura do sinal ( altura do prisma).

Isolando Z e aplicando 32 e 34:

$$z_{ij} = \cos^{-1} \left( \frac{(z_j - z_i + hs - hi)}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i + hs - hi)^2}} \right) \quad (40)$$

#### 2.2.4.3 Elipses de erros

A incerteza em relação à posição dos marcos geodésicos ocorre em ambas as direções e distâncias e o erro estimado da posição ajustada envolve as coordenadas x e y. Os valores representados por estes eixos da elipse de erros representa os desvios-padrão máximo e mínimo de uma coordenada em relação aos sistema cartesiano em que o ponto está referenciado e a covariância caracteriza a existência do ângulo de orientação  $\theta$ , que é a rotação do eixos da elipse em relação ao sistema cartesiano do ponto. Então, se a covariância for igual a zero, os eixos principais da elipse coincidirão com a direção dos eixos do sistema cartesiano.

Após o ajustamento das observações, os desvios-padrão estimados para as coordenadas ajustadas podem ser calculados a partir dos elementos da matriz de covariâncias. Os eixos das elipses são calculados aplicando as seguintes equações:

$$\sigma_{MÍN}^{2MÁX} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 \pm M} \quad (47)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}{n \cdot (n-1)} \quad (48)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2}{n \cdot (n-1)} \quad (49)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y) \quad (50)$$

$$M = \pm \sqrt{4\sigma_{xy}^2 + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} \quad (51)$$

Onde:

$\sigma_{MÍN}^{2MÁX}$ : são os valores dos eixos das elipses;

$\sigma_x^2$ : é a variância em x;

$\sigma_y^2$ : é a variância em y;

$n$ : é o número de observações em x e em y;

$\sigma_{xy}^2$ : é a covariância entre as coordenadas x e y;

$\mu$ : é a média dos valores de x e y;

$M$ : é calculado em função das variâncias em x e y e da covariância entre as duas variáveis.

Os semi-eixos maior e menor da elipse são os valores dos desvios-padrão máximo e mínimo para o ponto em questão e a orientação das elipses depende do ângulo  $\theta$  formado entre os eixos x e u (u faz parte do eixo uv auxiliar ortogonal aos eixos das elipses de erro). O eixo u define a direção do máximo erro esperado nas coordenadas da estação e o eixo v é ortogonal ao eixo u e define a direção do erro mínimo. O valor de  $\theta$  que orienta a elipse fornece os valores mínimos e máximos que podem ser determinados após o ajustamento dos elementos da matriz de covariâncias e é calculado por (GHILANI, 2010):

$$tg2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad (52)$$

A representação gráfica da elipse de erro é observada na FIGURA 4.

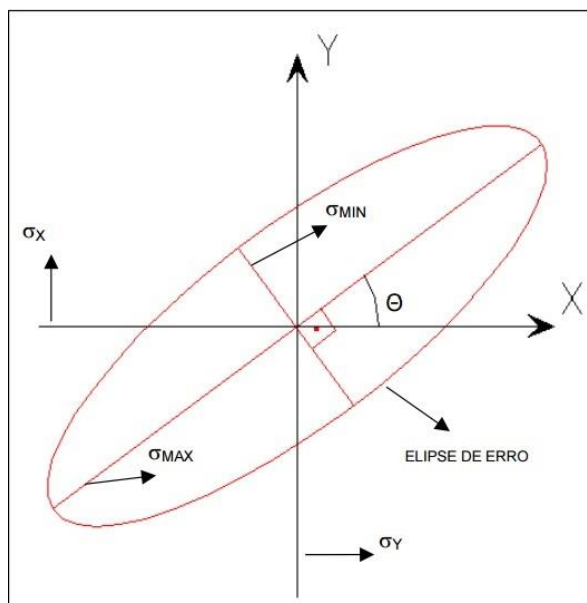


FIGURA 4 – ELIPSE DE ERRO  
FONTE: GEMAEL, 2004

### 2.3 POLIGONAÇÃO

O procedimento denominado de poligonação consiste em um método de observação de direções e distâncias entre vértices consecutivos de uma poligonal. A coleta de dados é realizada com a instalação da estação total em um dos vértices da poligonal de onde se observa a direção em relação ao vértice anterior (vértice ré), a direção ao vértice posterior (vértice vante) e as distâncias entre estes dois vértices. (INCRA, 2013).

Pelo método de caminhamento, o levantamento de uma poligonal é realizado, percorrendo-se o contorno de um itinerário definido por uma série de pontos, medindo-se todas as direções, distâncias e uma orientação inicial. A partir destes dados e de uma coordenada de partida, calculam-se as coordenadas de todos os pontos que formam esta poligonal.

Segundo Jordan (1981), as poligonais são classificadas em três tipos:

- Aberta: quando são conhecidas somente as coordenadas dos pontos de partida;
- Fechada: quando são conhecidas as coordenadas dos pontos de partida e chegada, ambas coincidentes;
- Enquadrada: quando são conhecidas as coordenadas dos pontos de partida e chegada, ambas diferentes.

Os dois últimos permitem a verificação de erros de fechamento angular e linear. A poligonação pode ser aplicada para o levantamento de galerias ou quando os pontos a serem controlados estão próximos uns dos outros (CHAVES, 1994).

U.S. Army (2002) indica duas configurações para o monitoramento nas galerias de inspeção:

- A partir de pontos de controle nas extremidades com prismas permanentemente instalados, um ponto no centro da galeria acomoda uma estação total que permanece fixa realizando observações nos pontos de monitoramento. Esta configuração permite utilizar estações totais robotizadas com o sistema de busca automática de alvos (Automatic Target Recognition - ATR), interligada a *softwares* específicos para o processamento *on-line*.
- A partir de dois pontos de controle fixos nas extremidades e estações móveis temporárias ou vértices de uma poligonal delimitada no percurso da galeria. Indica-se, neste caso, a utilização de sistemas de centragem forçada fixados nas paredes das galerias de inspeção para materializar as estações móveis.

O método da poligonação para levantamento no interior das galerias de inspeção que atravessam longitudinalmente a barragem (FIGURA 5) é utilizado onde se monitoram pontos próximos às junções de blocos (ZOCOLOTTI FILHO, 2005).

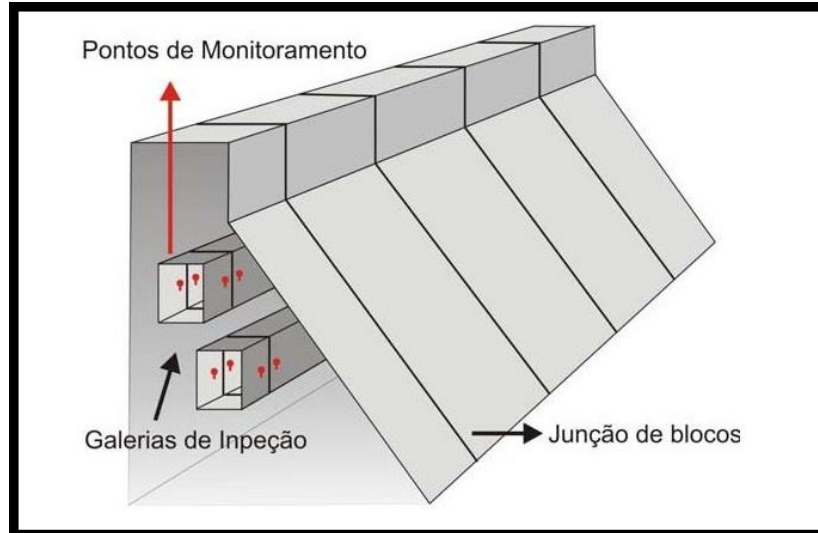


FIGURA 5 - PONTOS DE MONITORAMENTO DAS JUNÇÕES DE BLOCOS  
 FONTE: ZOCCOLOTTI FILHO, 2005

As coordenadas tridimensionais são calculadas da seguinte forma:

$$X_i = X_{i-1} + Dh_{i-1,i} \cdot \text{sen}Az_{i-1,i} \quad (53)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + Dh_{i-1,i} \cdot \text{cos}Az_{i-1,i} \quad (54)$$

$$Z_i = Z_{i-1} + Di_{i-1,i} \cdot \text{cos}Z_{i-1,i} + h_i + h_s \quad (55)$$

$$Dh_{i-1,i} = Di_{i-1,i} \cdot \text{sen}Z_{i-1,i} \quad (56)$$

onde:

$X_i, Y_i, Z_i$  : coordenadas do ponto em questão que se quer determinar;

$X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}$  : coordenadas do ponto anterior, conhecidas;

$Dh_{i-1,i}$  : distância horizontal entre o ponto anterior e o ponto em questão;

$Di_{i-1,i}$  : distância inclinada entre o ponto anterior e o ponto em questão;

$Az_{i-1,i}$  - azimute da direção;

$Z_{i-1}$  : ângulo zenital medido entre o ponto anterior e o ponto em questão;

$h_i$  : altura do instrumento;

$h_s$  : altura do sinal ou altura alvo.

Assim são determinadas as coordenadas dos pontos de monitoramento situados no interior da galeria de inspeção da UHE Mauá, chamados de Estações Geodésicas Internas ou EGIs.



FONTE: SIGUEL (2013)

As coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos de interesse são obtidas através das Equações 57, 58 e 59:

$$X_P = X_0 + D_i \sen Z. \sen Az \quad (57)$$

$$Y_P = Y_0 + D_i \sen Z. \cos Az \quad (58)$$

$$Z_P = Z_0 + (h_i - h_s + D_i \cos Z) \quad (59)$$

onde:

$X_P, Y_P, Z_P$  : Coordenadas do ponto P no referencial local;

$X_0, Y_0, Z_0$  : Coordenadas da origem;

$h_i$  : Altura do instrumento;

$h_s$  : Altura do sinal;

$D_i$  : Distância inclinada;

$A_Z$  : Azimute (considerando que o eixo Y esta orientado para a direção norte);

$Z$  - Ângulo zenital.

A partir da irradiação são determinados os pontos de monitoramento à montante (MSUs) e à jusante (MGEs). As coordenadas destes pontos e aquelas obtidas a partir da poligonal no interior da galeria (EGIs) são submetidos ao teste estatístico do item 2.2.2 para verificação da ocorrência de deslocamentos em relação à rede geodésica, a um grau de confiança de 95%.

## 2.5 INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS DE MONITORAMENTO

Os métodos de levantamentos já abordados oferecem os resultados de monitoramento geodésico da UHE Mauá. Para integrar estes resultados com o monitoramento geológico e oriundo da Engenharia Civil, apresentam-se, a seguir, alguns métodos utilizados nestas respectivas áreas.

As observações coletadas a partir da poligonação dentro da galeria de inspeção são realizadas nos pontos situados nas junções dos blocos mostrados na FIGURA 5. Nestas junções estão os medidores triortogonais que fazem parte do monitoramento relativo de responsabilidade da Engenharia Civil.

A análise de imagens realizadas por modelos digitais de elevação, imagens orbitais e fotografias aéreas, permitiu a identificação de alinhamentos estruturais preferenciais que, juntamente com o mapeamento geológico local, onde foram obtidas as principais direções de descontinuidades do maciço rochoso, bem como a definição dos parâmetros geotécnicos, permitiu a adequada seleção da região da barragem onde foram instalados os sensores de fibra óptica para o monitoramento de microdeformações da estrutura.

Matos (2002) apresenta ainda outros tipos de instrumentos utilizados na auscultação de barragens de concreto que não serão abordados neste trabalho. Por exemplo: pêndulos diretos e invertidos, cordinômetros, extensômetros múltiplos de haste, alongômetros e deformímetros.

Além disso, na região do reservatório foi instalado um conjunto de sismógrafos para detecção de sismicidade natural ou decorrente da atividade antrópica provocada pela detonação de explosivos, fechamento da barragem, enchimento do reservatório e sismos induzidos pelos esforços provocados no terreno.

Estas modalidades de monitoramento são expostas a seguir e seus resultados são integrados a partir do cálculo do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (CARGNELUTTI FILHO *et al*, 2011).

#### 2.5.1 Medidor triortogonal

O medidor triortogonal tem a finalidade de registrar os deslocamentos diferenciais em juntas e fissuras de barragens, galerias, túneis, maciços rochosos, entre outros, nos três eixos ortogonais (x, y, z).

Estes deslocamentos entre blocos, no sentido das três direções ortogonais entre si, podem ser investigados com o uso de bases de extensômetros ou medidores triortogonais, instalados nas juntas de contração entre blocos. Segundo Matos (2002), estes deslocamentos podem ser:



- Recalques diferenciais entre blocos;
- Deslocamentos cisalhantes horizontais;
- Movimentos de abertura-fechamento das juntas.

Na FIGURA 7 pode-se observar um medidor triortogonal desmontado antes de ser fixado na estrutura.

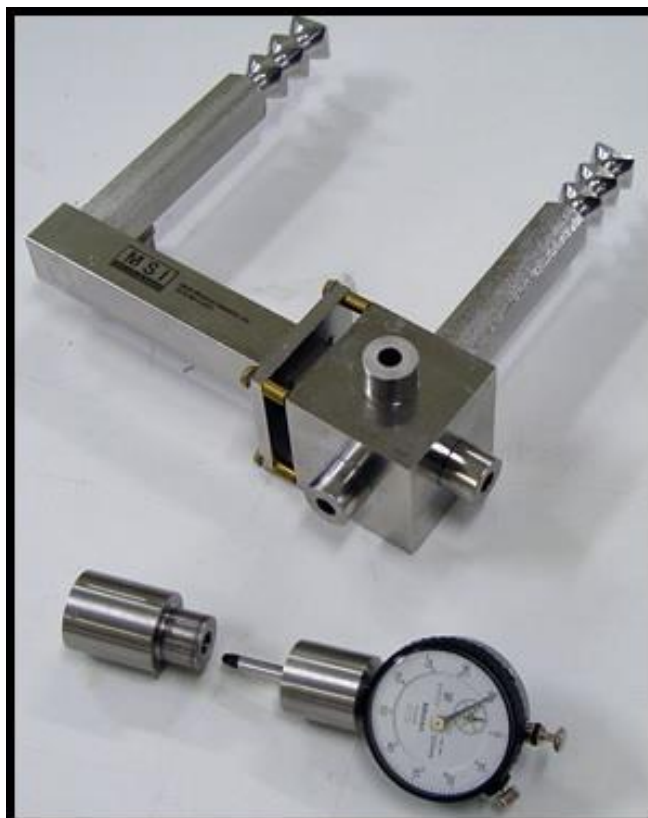


FIGURA 7 - MEDIDOR TRIORTOGONAL DESMONTADO  
FONTE: MSI (2013)

Com o auxílio de um sistema de apoios construído em aço inoxidável e fixado na estrutura, os deslocamentos são verificados nas direções dos três eixos ortogonais, conforme FIGURA 8.



FIGURA 8 - LEITURA UTILIZANDO RELÓGIO COMPARADOR DIGITAL E SISTEMAS DE EIXOS  
FONTE: ADAPTADO DE ITAIPU (2013)

A orientação do sistema de eixos triortogonais é feita no sentido de que o eixo x forneça os deslocamentos de abertura/fechamento das juntas, o eixo y forneça os deslocamentos horizontais e o eixo z forneça os deslocamentos verticais.

#### 2.5.2 Sensores de fibra óptica

A partir do mapeamento de relevo com base na análise de imagens e boletins de sondagem realizados anteriormente à construção da barragem, instalaram-se sensores nos locais da estrutura que apresentam maior potencial de deformação.

Na FIGURA 9 são expostas as posições e as profundidades dos furos da sondagem de referência (em preto) bem como a projeção dos furos executados para a instalação dos sensores de fibra óptica, destacados na cor amarela, a partir do corte longitudinal que passa pelo eixo da galeria com direcionamento de jusante para montante (FIGUEIRA *et al*, 2013).

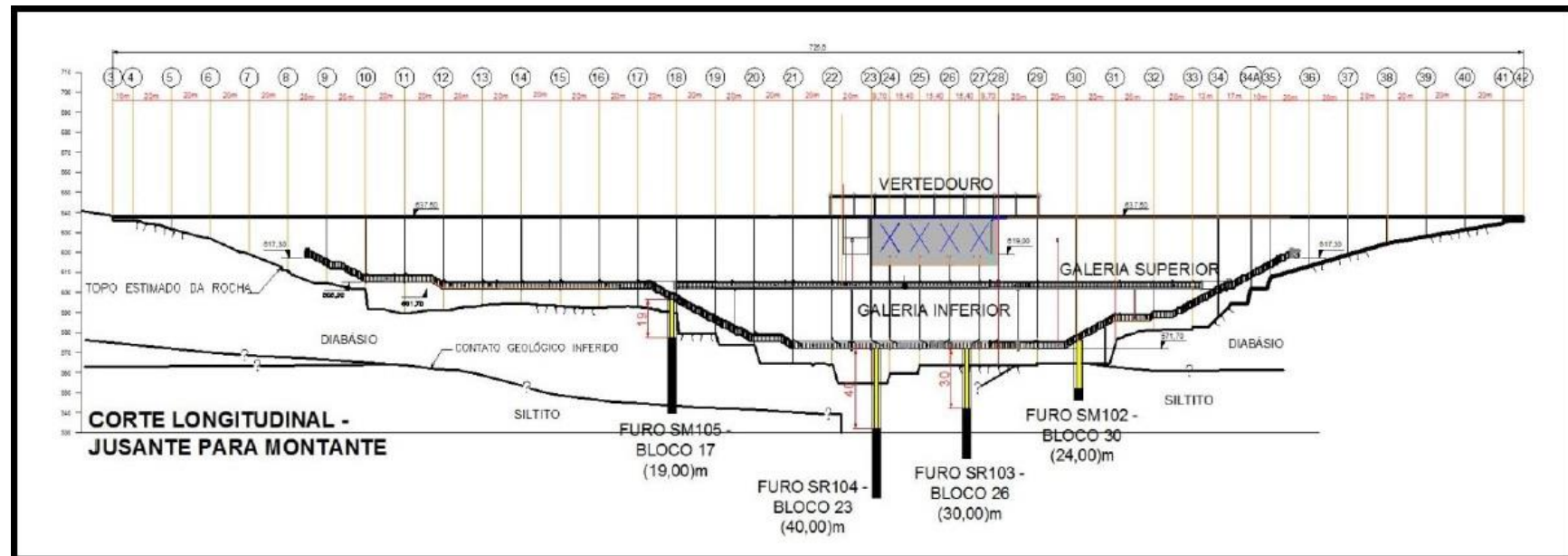


FIGURA 9 - FUIOS DE SONDAGEM ONDE FORAM INSTALADOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA  
 FONTE: FIGUEIRA *et al* (2013)

Na FIGURA 10 destaca-se o posicionamento dos sensores no furo SM 102. É possível observar a profundidade de cada sensor em relação à superfície da galeria inferior.

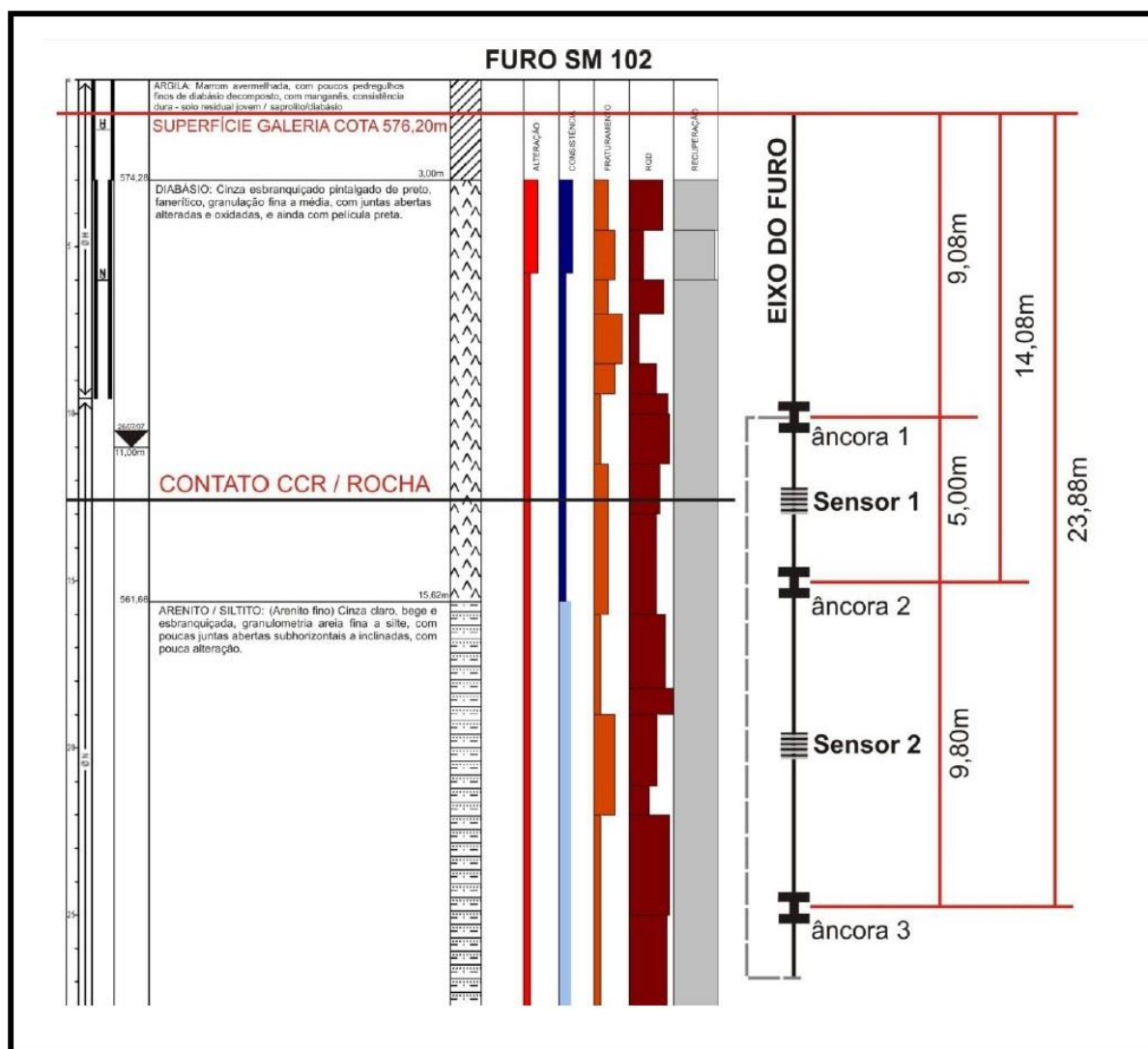


FIGURA 10 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES SOBRE UM DOS FUROS DE SONDAGEM

FONTE: FIGUEIRA *et al* (2013)

São monitorados deformação e temperatura adotando-se sensores pontuais do tipo redes de Bragg e distribuídos como DTSS (*Distributed Temperature and Strain Sensing*) e DTS (*Distributed Temperature Sensing*). Redes de Bragg são sensores

introduzidos no núcleo de fibras ópticas do tipo monomodo através da exposição lateral a um padrão periódico de intensa luz ultravioleta (FIGUEIRA *et al*, 2013).

O princípio físico natural que ocorre no interior do núcleo de uma fibra ótica chamado de retroespalhamento é o resultado da colisão dos feixes de luz incididos no interior da fibra ótica com a estrutura atômica do material que compõe o núcleo. Este princípio é responsável pela determinação do parâmetro medido (temperatura ou deformação) pelos sensores distribuídos do tipo DTS e DTSS.

A exposição lateral ao padrão periódico de intensa luz ultravioleta produz um aumento permanente no índice refrativo da fibra. Assim, toda a luz com comprimento de onda que satisfaça a condição de Bragg que passe pela marcação, será afetada e refletida ao emissor (FIGUEIRA *et al*, 2013).

É possível a quantificação dos parâmetros de índice de refração e comprimento de onda, devido à dependência em relação às variações térmicas e de deformação. A (FIGURA 11) ilustra o princípio de funcionamento dos sensores pontuais de redes de Bragg (FIGUEIRA *et al*, 2013).

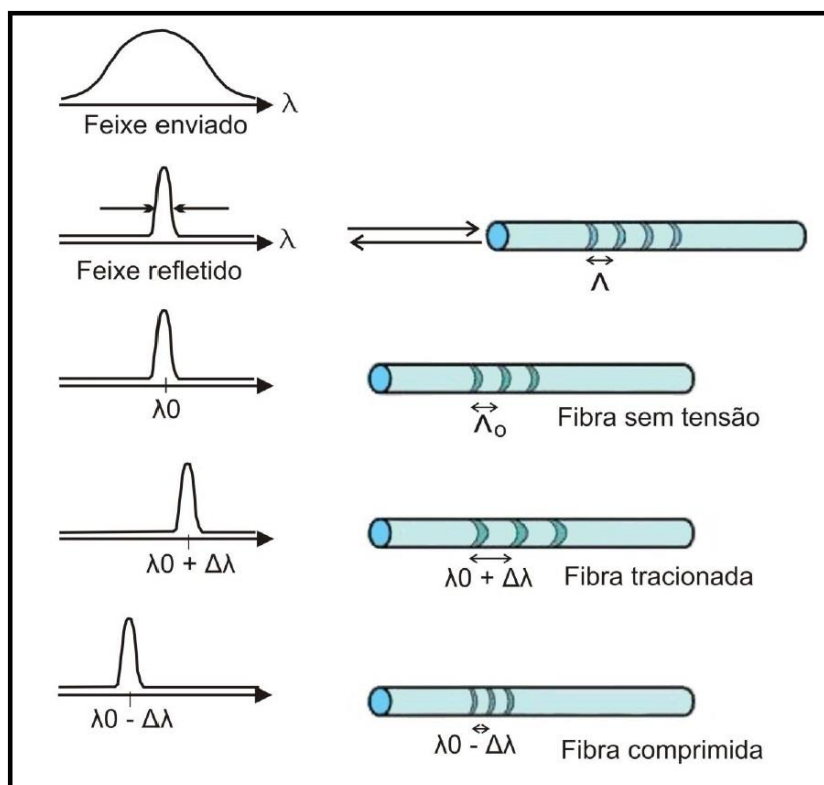


FIGURA 11 - RESPOSTA DA FIBRA EM FUNÇÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO.  
FONTE: FIGUEIRA *et al* (2013)

As fibras ópticas são posicionadas na vertical e seu comportamento indica o sentido do deslocamento. Quando tracionada, há movimento ascendente da estrutura e quando comprimida, há subsidência.

Maiores informações sobre a instalação e funcionamento dos sensores de fibra óptica utilizados na UHE Mauá, recomenda-se Figueira *et al* (2013).

### 2.5.3 Sismógrafos

Segundo Copel (2013), com os procedimentos do enchimento do Reservatório e o início da fase operacional, tem-se um novo ambiente geológico/geotécnico local, que pode refletir ou não na acomodação de maciços rochosos em sub-superfície, ajustes em planos de falha preexistentes, além de subsidência localizada (visível) em superfície.

A fim de monitorar a sismicidade do local afetado pela barragem da UHE Mauá, decorrente de movimentos tectônicos (sismicidade natural) e da atividade antrópica relacionada a detonações com explosivos, fechamento da barragem e enchimento do reservatório, eventuais sismos induzidos devido às novas condições de esforços provocados na região do reservatório, são distribuídas, na rede de monitoramento da UHE Mauá, quatro estações sismográficas, denominadas TLMC1, TLCM2, TLMC3 e TLMC4, num arranjo geográfico que encobre todo o entorno da região do reservatório na sua capacidade máxima (COPEL, 2013).

Segundo Copel (2013):

*O monitoramento sismológico da área do empreendimento Hidrelétrico Mauá iniciou-se no dia 17 de Junho de 2010 com a instalação da primeira estação sismográfica denominada TLMC1. Esta estação consiste de um sismógrafo digital e de um sismômetro triaxial fabricado pela empresa canadense Nanometrics. Este equipamento é classificado com de banda larga, ou seja, trabalha em uma ampla faixa de frequência sendo adequado para registrar sismos locais, regionais e também telessismos. Os procedimentos de instalação, bem como as características do equipamento foram descritas no Relatório de Instalação (EC-02 MC-01), emitido no dia 12 de Julho de 2010. Entre os dias 20 e 25 de julho de 2011 foram instaladas duas novas estações sismológicas em um raio de 10 km de distância da barragem e no dia 09 de fevereiro de 2012 foi instalada a quarta estação,*

*ficando completa a rede de monitoramento com quatro estações. Cada uma destas estações consiste de um sismógrafo digital e de um sismômetro triaxial de curto período fabricado pela empresa SARA Eletronics.*

*Para efeito de cadastro no Banco de Dados da Rede Mundial, as estações foram denominadas TLMC1, TLCM2, TLMC3 e TLMC4.*

Estes fenômenos podem liberar energia de deformação passível de captação pelos sismômetros das Estações Sismológicas TLMC. Cada uma destas estações está equipada com um sismógrafo digital e um sismômetro triaxial de curto período.

Os eventos são classificados de acordo com sua categoria: telessismos, sismos regionais, sismos locais e detonações. Essa classificação é feita de acordo com as distâncias “epicentrais”, ou seja, a distância entre o local de ocorrência de determinado sismo e a estação sismológica que o registrou (QUADRO 3).

TIPO DO SISMO	DISTÂNCIA EPICNETRAL
Sismo Local	0 – 100km
Sismo Regional	100 – 200km
Telessismo	> 200km

QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS SÍSMICOS  
FONTE: COPEL (2013)

A fase de enchimento do reservatório e o início da fase operacional pode ser considerada a mais crítica na etapa de monitoramento da sismicidade induzida, de modo a requerer uma atenção redobrada na leitura dos registros (COPEL, 2013).

#### 2.5.4 Cálculo do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson

A análise correlacional indica a relação entre duas variáveis. A partir do conhecimento dos valores dos coeficientes de correlação é possível analisar, por exemplo, se algum abalo detectado por sismógrafos tem relação com a movimentação detectada pelos métodos geodésicos. É possível também verificar se existe correlação entre os movimentos dos pontos de monitoramento e dos locais monitorados pelos sensores de fibra óptica ou pelos medidores triortogonais.

O coeficiente de correlação de Pearson é normalmente representado pela letra  $\rho$  e é calculado pela seguinte fórmula (CARGNELUTTI FILHO *et al*, 2011).

$$\rho = \frac{\sum(x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y)}{\sqrt{(\sum(x_i - \mu_x)^2) \cdot (\sum(y_i - \mu_y)^2)}} \quad (60)$$

Obs. As variáveis x, y e z não correspondem às coordenadas tridimensionais monitoradas. Neste cálculo de correlação, são variáveis que representam as observações geológicas, geodésicas e da Engenharia Civil correlacionadas.

Se o coeficiente de correlação diz respeito ao deslocamento detectado em uma junção de blocos pela Geodésia, utilizando a irradiação e pela Engenharia Civil, utilizando um medidor triortogonal por exemplo, x corresponde à primeira e y corresponde à segunda, respectivamente.

Onde:

$(x_i - \mu_x)$  é o deslocamento verificado pela Geodésia e

$(y_i - \mu_y)$  é o deslocamento verificado pela Engenharia Civil

Como o coeficiente de correlação é isento de unidades e da ordem de grandeza das variáveis, assume valores entre -1 e 1. Quando a relação é positiva,  $\rho$  assume o valor 1 se a relação for perfeita e diretamente proporcional, ou seja, o valor da variável x aumenta proporcionalmente ao acréscimo do valor da variável y. Quando a relação é negativa,  $\rho$  assume o valor -1 se a relação for perfeita e inversamente proporcional, ou seja, o valor da variável x aumenta conforme o valor da variável y diminui. O coeficiente  $\rho$  será igual a 0 quando a relação é difusa ou não linear (LIRA, 2004).

Qualitativamente, o coeficiente de correlação pode ser avaliado da seguinte forma (LIRA, 2004):

- para valores acima de 0,7, positivo ou negativo, indica uma correlação forte;
- para valores entre 0,3 e 0,7, positivo ou negativo, indica uma correlação moderada;
- para valores entre 0 e 0,3, positivo ou negativo, indica uma correlação fraca.



Então, quanto mais próximo de 1, maior a correlação entre as variáveis.  
Quanto mais próximo de 0, menor esta correlação.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho divide-se em procedimento de campo para coleta de dados e elaboração de um sistema para processamento dos dados e representação dos resultados obtidos em cada campanha de levantamento. No tocante ao campo, são descritos apenas os procedimentos relevantes que trouxeram inovações em relação a certos cuidados para otimizar a coleta de dados e melhorar os resultados.

Em relação ao sistema, são apresentados os processos necessários ao processamento e combinação de diferentes métodos e técnicas utilizados na Auscultação Geodésica de estruturas e também de outras áreas já mencionadas anteriormente, buscando viabilizar agilidade no tratamento do grande volume de informações gerado em um procedimento como este.

As campanhas utilizadas para validação da pesquisa são parte de uma série histórica de 16 campanhas com início em 31 de março de 2012. As campanhas denominadas 15 e 16 foram realizadas, respectivamente, no período de 16 a 18 de dezembro de 2014 e 30 de março a 1 de abril de 2015. Estas campanhas foram escolhidas porque foi necessário adaptar a metodologia de coleta de dados ao sistema em desenvolvimento.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDOS

A UHE Mauá situa-se na região centro-oeste do Paraná, posicionada nas coordenadas 24°02'24" de latitude Sul e 50°41'33" de longitude Oeste. Está construída na região do Salto Mauá, porção média do rio Tibagi, na divisa entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (FIGURA 12), no estado do Paraná (LACTEC, 2007).

O acesso ao empreendimento pode ser feito a partir da Capital do Estado, pela BR-277 até Spréa, município de Palmeira, seguindo pela BR-376 até a cidade de Imbaú e pela rodovia PR-160 até a cidade de Telêmaco Borba. Seguindo pela estrada

vicinal de acesso à Klabin Fábrica de Papel e Celulose S.A., proprietária das terras da margem direita do rio Tibagi, até a vila Mauá, chega-se ao núcleo populacional situado na margem direita do rio, próximo à UHE. Para acessar a margem esquerda, a partir de Imbaú, segue-se pela BR-376 até a cidade de Ortigueira. Seguindo pela estrada vicinal, passando pelo distrito de Lageado Bonito e pela comunidade Sapé, chega-se ao empreendimento pela margem esquerda do rio Tibagi.

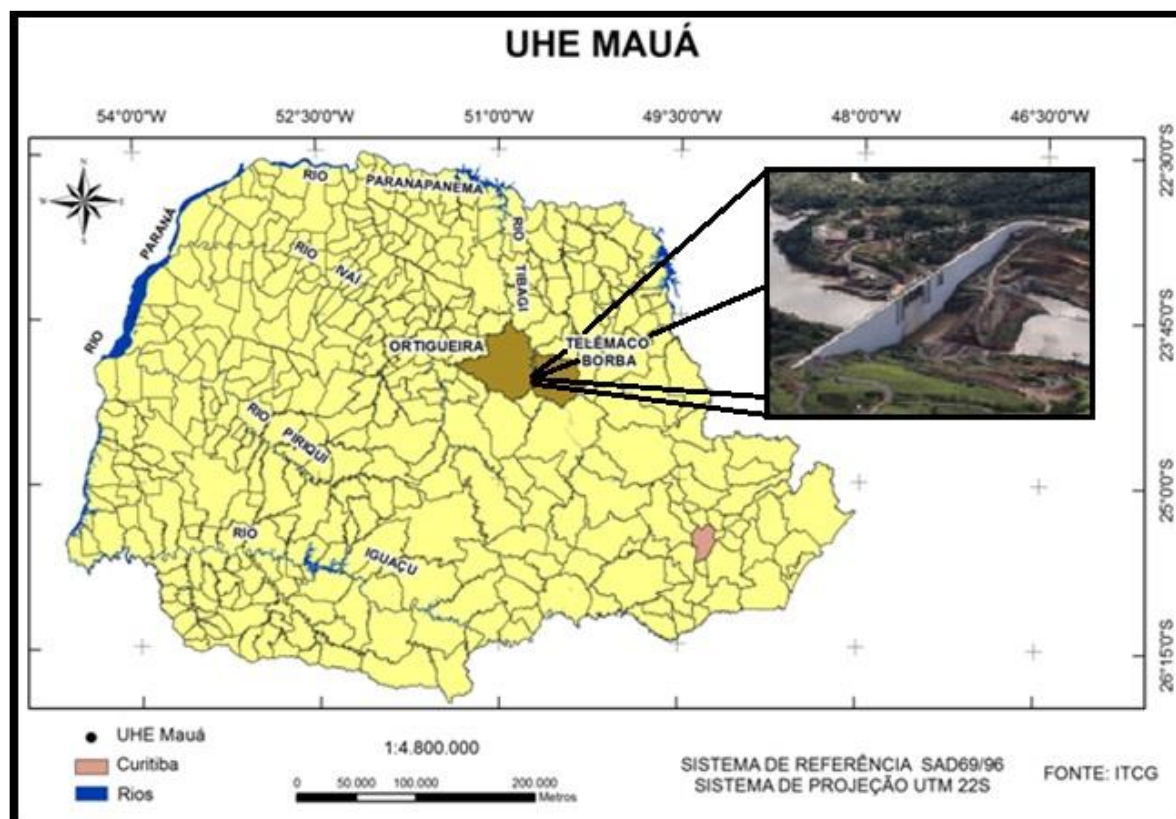


FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ  
FONTE: SIGUEL (2013)

A UHE possui potência total instalada de 363 MW, sendo 352 MW gerados pela usina principal e 11 MW gerados pela usina complementar, instalada junto à barragem para aproveitar a vazão sanitária do rio. Tem capacidade para atender ao consumo de aproximadamente 1 milhão de pessoas (COPEL, 2014).

A barragem possui 745m de comprimento na crista e altura máxima de 85m. Seu reservatório atinge, no nível máximo normal, uma área de 83,9km². Está a distância de 600m à montante da PCH Presidente Vargas responsável pela geração de 22,5 MW de energia para a empresa Klabin S.A., situada às margens do rio Tibagi,

no município de Telêmaco Borba (CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL, 2013).

A FIGURA 13 contém o esboço da UHE Mauá, com a PCH à jusante.



FIGURA 13 - PROJETO DA UHE MAUÁ.  
FONTE: CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL (2013)

O Salto Mauá constitui uma série de corredeiras existentes em curva que o rio Tibagi faz para a direita. Para aproveitar um desnível de 120m ao longo da curva, é construído um circuito para levar a água do reservatório até a casa de força da usina principal, composto de tomada de água de baixa pressão, túnel adutor escavado em rocha, com 1922m de comprimento, câmara de carga, tomada de água de alta pressão e três túneis forçados no trecho final (LACTEC, 2007).

O túnel desemboca na câmara de carga em que se situa a tomada de água de alta pressão, onde estão os três túneis forçados que levam a água para as unidades geradoras, na casa de força. A vazão sanitária entre a barragem e a restituição do canal de fuga é mantida pela usina secundária (LACTEC, 2007).

A FIGURA 14 ilustra a barragem da UHE de Mauá utilizada para criação do reservatório e que serve, também, de ponte para ligação entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, no Paraná.

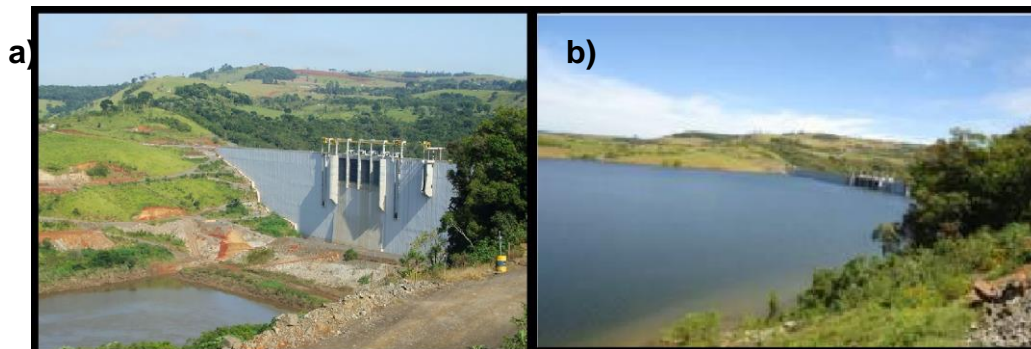


FIGURA 14 - BARRAGEM ANTES (A) E DEPOIS (B) DA FORMAÇÃO DO RESERVATÓRIO  
FONTE: O AUTOR

A usina está construída sobre solo composto predominantemente de arenitos e siltitos com intrusões disseminadas de rochas ígneas básicas. A região do reservatório da UHE Mauá está incluída na Província Hidrogeológica do Paleozóico Médio, que tem como principal reservatório de água subterrânea os arenitos da Formação do Rio Bonito. Durante a fase de operação da UHE, pode ocorrer impacto quanto ao aumento na recarga do aquífero Rio Bonito (LACTEC, 2007).

Neste sentido, a UHE Mauá apresenta grande interesse no monitoramento do comportamento da sua estrutura, em razão da menor previsibilidade da geologia, da menor resistência mecânica do solo e maior suscetibilidade às ações hidráulicas e do intemperismo das rochas sedimentares (LACTEC, 2007).

Em seguida, descreve-se a metodologia empregada na determinação das alturas dos prismas e fixação do parafuso da base nivelante.

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PRISMA

Para estabelecer um elemento a mais de minimização de erros grosseiros no procedimento de coleta dos dados, Siguel (2013) desenvolveu um procedimento para



fixar e determinar a altura do prisma em laboratório que será utilizado neste trabalho.

Este procedimento deve ser seguido porque as coordenadas planialtimétricas obtidas após o processamento dos levantamentos realizados utilizando os receptores GNSS podem ter um resultado diferente em função da altura das antenas instaladas. Já as coordenadas dos pontos calculadas a partir das observações utilizando a Estação Total dependem dos ângulos zenitais e distâncias inclinadas, que por sua vez dependem das alturas da estação total e do prisma definidas no momento da sua calagem. Por isso, as alturas foram fixadas e seus valores determinados em laboratório.

### 3.2.1. Fixação de um parafuso calante da base nivelante

Utilizando um adaptador que permite o travamento de um dos parafusos calantes (FIGURA 15) desenvolvido para esta finalidade (SIGUEL, 2013), a altura da base nivelante mantém-se constante, uma vez que, ao realizar o nivelamento com apenas dois parafusos, a altura do plano horizontal fica definida em função da posição do calante fixo.



FIGURA 15 - ADAPTADOR UTILIZADO PARA TRAVAR O PARAFUSO CALANTE  
FONTE: SIGUEL (2013)

Na FIGURA 16-a e FIGURA 16-b é possível verificar um dos parafusos calantes travado (A) e a base desnivelada. Neste caso, o ponto A pertence ao plano  $\pi'$  e  $\pi$  (plano horizontal), enquanto os parafusos B e C pertencem ao plano  $\pi'$ . Já na FIGURA 16-c há a indicação da base nivelada com todos os pontos pertencendo ao mesmo plano.

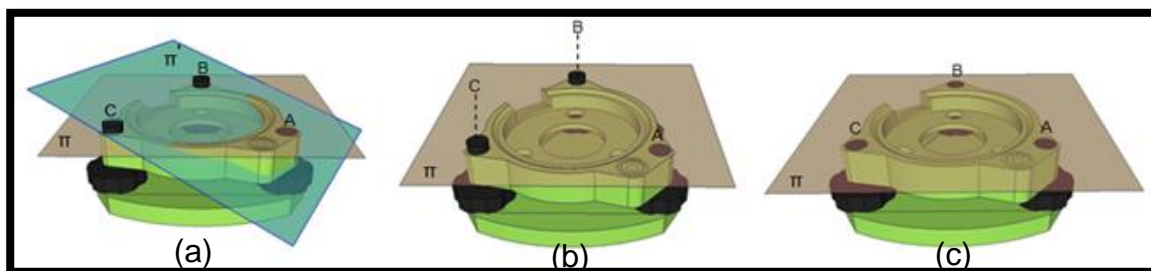


FIGURA 16 - CALAGEM DAS BASES NIVELANTES  
FONTE: SIGUEL (2013)

### 3.2.2 Medida preliminar da altura do prisma

Para garantir a altura do conjunto de bases nivelantes e prismas ao longo das diversas campanhas de levantamento e também para medir estas alturas, foram efetuados os seguintes procedimentos:

- a) Colocam-se os parafusos calantes no meio do curso. Em seguida, os adaptadores desenvolvidos (FIGURA 15) são encaixados impossibilitando a movimentação dos parafusos.
- b) Uma vez fixos, verifica-se a altura das bases se estão aproximadamente iguais. Adotando uma das bases como referência, sua altura é medida com um paquímetro (FIGURA 17). A altura das demais é ajustada em relação à base cuja altura ficou estabelecida como referência, movimentando o parafuso calante que é “travado”.

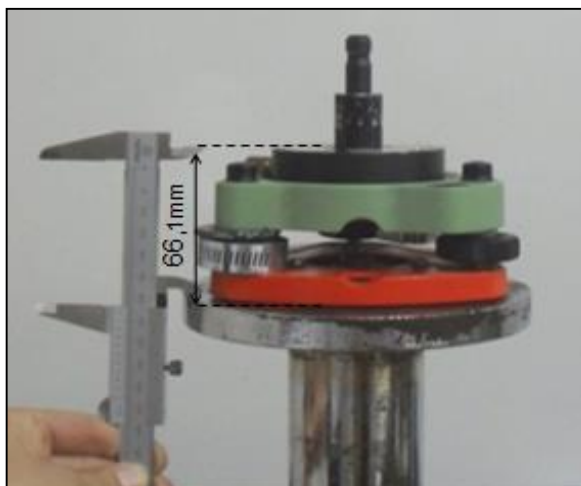


FIGURA 17 - MEDIDA DA ALTURA DA BASE UTILIZANDO PAQUÍMETRO  
FONTE: SIGUEL (2013)

- c) Na sequência, uma abraçadeira encaixada ao redor do parafuso fixo impede o acesso a ele (FIGURA 18).



FIGURA 18 - PARAFUSO CALANTE TRAVADO  
FONTE: SIGUEL (2013)

- d) Por fim, os prismas são encaixados sobre as bases e suas alturas medidas com paquímetro. No caso descrito, a altura resultou definida como 17,72 centímetros. Na FIGURA 19 pode-se visualizar a altura do pino adaptador e do prisma.



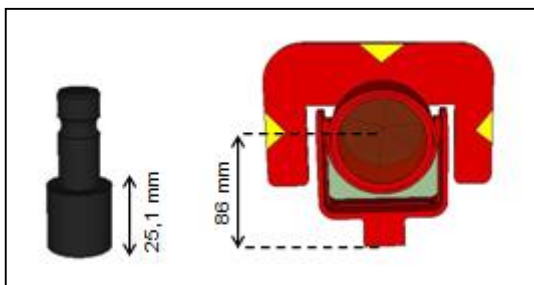


FIGURA 19 - ALTURA DO PINO ADAPTADOR E DO PRISMA  
FONTE: SIGUEL (2013)

### 3.2.3 Determinação precisa da altura do conjunto composto por base nivelante e prisma

Outro procedimento para a determinação da altura dos conjuntos de bases e prismas pode ser adotado utilizando técnicas de nivelamento de precisão:

- a) Primeiramente, nivelam-se, com o uso de um nível tubular, dois tripés industriais pertencentes ao LAIG (FIGURA 21);
- b) Em seguida, são instalados e nivelados sobre os tripés o nível digital DNA03 e um dos conjuntos de bases e prismas;
- c) Para determinar a altura dos equipamentos (base nivelante e prisma) efetuam-se observações em posições específicas, indicadas na FIGURA 20, ou seja, na base da base nivelante (1) e em um ponto localizado no centro do prisma (2);
- d) O nível deve permanecer na mesma posição durante todo o procedimento. Já a base dos tripés industriais pode sofrer movimentos verticais. Assim, a base do tripé contendo o conjunto de base e prisma sofre deslocamentos verticais até que o fio médio do nível coincida com o ponto de interesse;
- e) Uma mira de ínvar de 1 metro, posicionada em um ponto de referência em frente aos equipamentos medidos é utilizada para a leitura com o nível;
- f) A altura das bases e prismas é calculada pela diferença entre as leituras do ponto superior e inferior. Caso se realizem três séries de observações para cada uma das posições indicadas, como no caso escrito, o valor final é dado pela média aritmética;

- g) O processo deve ser inteiramente repetido para medir a altura de todos os equipamentos de interesse.

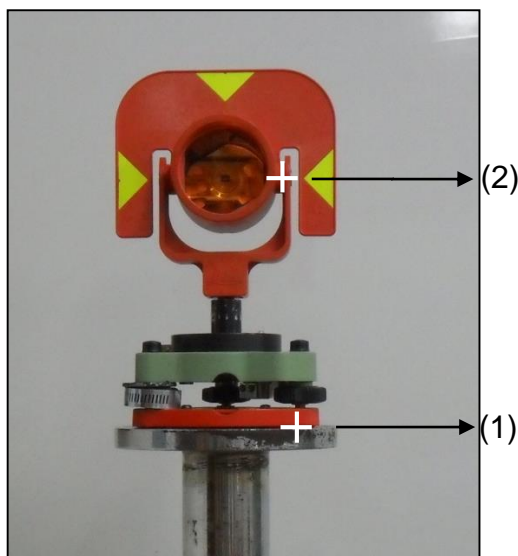


FIGURA 20 - POSIÇÃO DOS PONTOS ONDE FORAM FEITAS AS SÉRIES DE LEITURA  
FONTE: SIGUEL (2013)

Parte do procedimento efetuado pode ser visto na FIGURA 21.

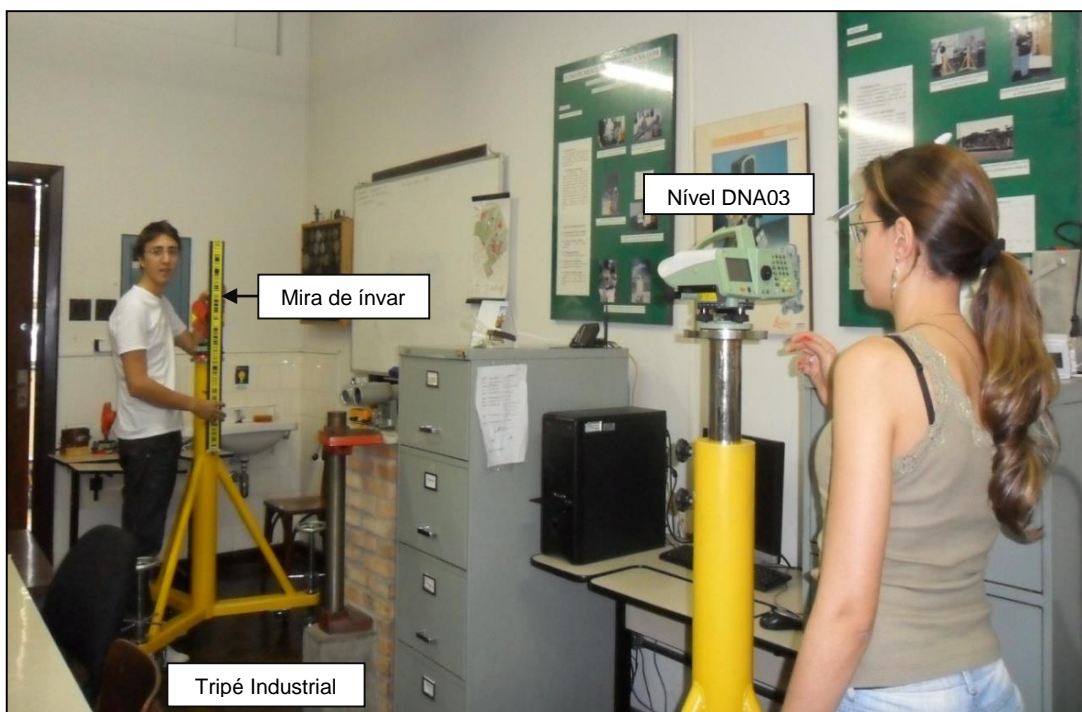


FIGURA 21 - PROCESSO PARA OBTENÇÃO DA ALTURA DOS CONJUNTOS DE BASES E PRISMAS  
FONTE: SIGUEL (2013)

### 3.3 LEVANTAMENTO DA REDE POR GNSS

A rede geodésica de monitoramento da UHE Mauá é composta por três pilares de concreto que possuem fundação, preservando sua estabilidade. Na FIGURA 22 apresenta-se um croqui com a disposição dos pontos da rede geodésica em relação à barragem.

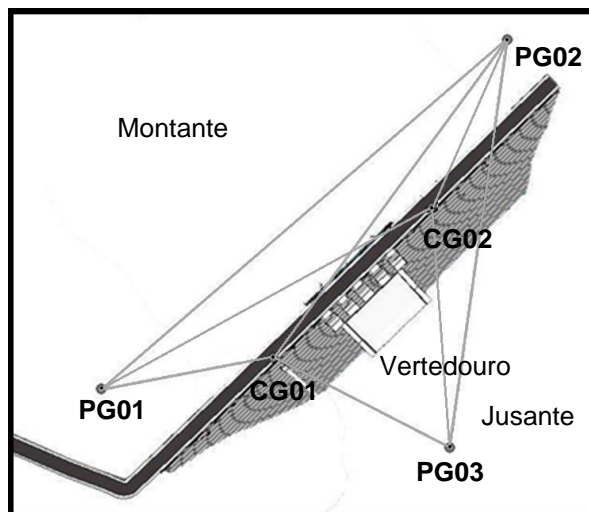


FIGURA 22 - CROQUI COM PONTOS DA REDE GEODÉSICA DA UHE MAUÁ  
FONTE: ADAPTADO DE SIGUEL (2013)

Dois destes pilares são implantados à montante (PG01 e PG02) e um pilar à jusante (PG03). A materialização dos pontos fica por conta de dispositivos de centragem forçada (FIGURA 23), que são peças instaladas sobre estes pilares e garantem a repetibilidade da ocupação dos equipamentos de medição.



FIGURA 23 - PILAR PG03 E DISPOSITIVO DE CENTRAGEM FORÇADA  
FONTE: O AUTOR

Além disso, dois dispositivos de centragem forçada são instalados na crista da barragem (CG01 e CG02) permitindo uma ligação entre os pontos à montante e à jusante. Mesmo com eles, não é possível realizar visada entre os pontos PG01 e PG03 no momento do levantamento com estação total.

Os cinco marcos geodésicos da rede são ocupados, simultaneamente, por receptores GNSS, com tempo mínimo de rastreamento de 6 horas. Os receptores são identificados em relação aos marcos geodésicos de modo a utilizar o mesmo conjunto marco-receptor em todas as campanhas.

As antenas são instaladas empregando-se bases nivelantes com um dos parafusos calantes travado, cuja metodologia e finalidade do procedimento são descritas no item 3.2. Assim, considerando que as bases possuem sempre a mesma altura, não é necessário, em cada ocupação, medir a altura da antena utilizada na fase de processamento. A FIGURA 24 traz um exemplo da antena instalada no ponto CG01.



FIGURA 24 - ANTENA GPS SOBRE CG01  
FONTE: SOARES et al (2015)

O PG02 é processado em relação aos pontos UFPR, Ourinhos, Guarapuava e Maringá da RBMC, utilizando taxa de gravação de 15s. Para realizar o Transporte de Coordenadas, utiliza-se o PG02 como base e realiza-se a determinação das coordenadas dos demais marcos geodésicos, com taxa de gravação de 1s. Após a realização do processamento e da redução das coordenadas destes pontos à uma época de referência, é feita a verificação da estabilidade regional dos pontos da rede.

### 3.4 LEVANTAMENTO DA REDE COM ESTAÇÃO TOTAL

Utilizando a estação total, efetuam-se os métodos de trilateração e triangulação com as bases nivelantes também com um de seus parafusos calantes travado para evitar a necessidade de medida da altura do instrumento e dos prismas (metodologia descrita no item 3.2). Realizam-se nove séries de leituras pela técnica de pares conjugados, buscando minimizar a incidência de erros acidental e sistemático, respectivamente.

Na FIGURA 25 - A, observa-se a estação total instalada no pilar PG01 e na FIGURA 25 – B, um detalhe com a identificação do pilar na base nivelante com um parafuso travado. Como no levantamento GNSS, as bases nivelantes são identificadas em relação aos marcos geodésicos para permitir a mesma ocupação nas diferentes campanhas.



FIGURA 25 - ESTAÇÃO TOTAL NO PG01 E PARAFUSO CALANTE TRAVADO  
FONTE: O AUTOR

Com a estação total ocupando PG01 e orientada em PG02, efetuam-se as leituras das direções horizontais, distâncias inclinadas e ângulos zenitais em PG02, CG02 e CG01. Sucessivamente, todos os marcos geodésicos são ocupados pela estação total.



Na FIGURA 26 observa-se o prisma no marco geodésico PG02 e a indicação de PG01 e dos outros prismas nos marcos CG01 e CG02.



FIGURA 26 - PRISMA NO PILAR PG02  
FONTE: O AUTOR

### 3.5 POLIGONAÇÃO

Para a determinação das coordenadas das Estações Geodésicas Internas (EGIs) dentro da galeria de inspeção, utiliza-se um dispositivo de centragem forçada (D.C.F.) no formato de mão francesa onde se instalam a estação total e os prismas de ré e vante. Os D.C.F são afixados em esperas metálicas, assim chamados os suportes situados nas paredes do interior da galeria, conforme FIGURA 27.

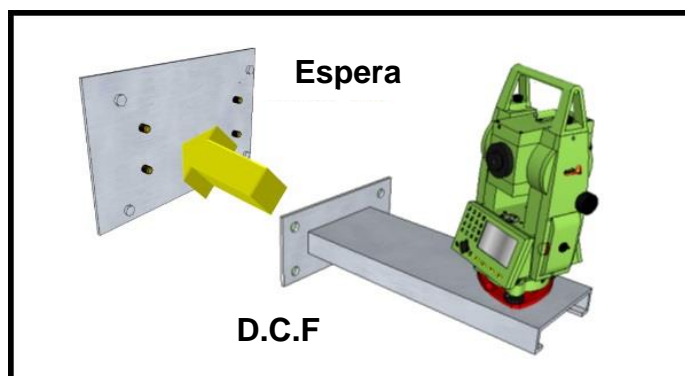


FIGURA 27 - FIXAÇÃO DO D.C.F. NA ESPERA  
FONTE: SOARES et al (2015)

A FIGURA 28 apresenta estação total e prisma instalados e prontos para a utilização.



FIGURA 28 - ESTAÇÃO TOTAL E PRISMA PRONTOS PARA USO  
FONTE: SOARES et al (2015)

As EGIs possibilitam a verificação de deslocamentos absolutos dos blocos da galeria e são materializadas por duas hastes de suporte para refletor (FIGURA 29) nas junções entre os blocos, ou seja, no mesmo local onde estão instalados os medidores tri-ortogonais (FIGURA 30-a). Na FIGURA 30-b observa-se a foto da junção dos blocos 10 e 11.

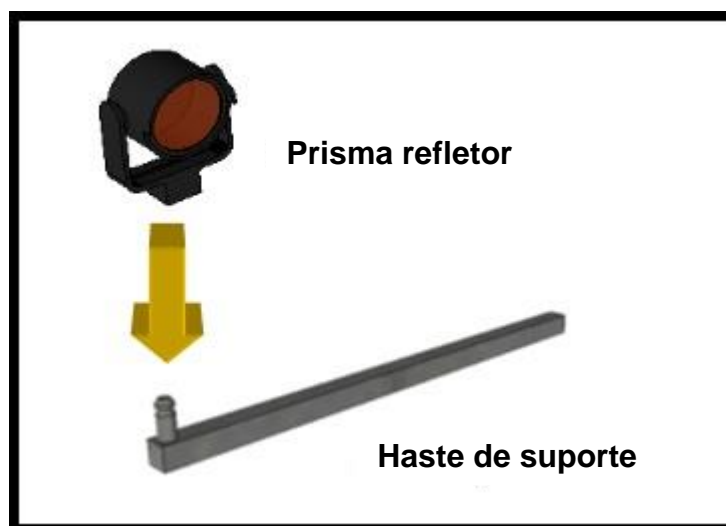


FIGURA 29 - PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA  
FONTE: SOARES et al (2015)

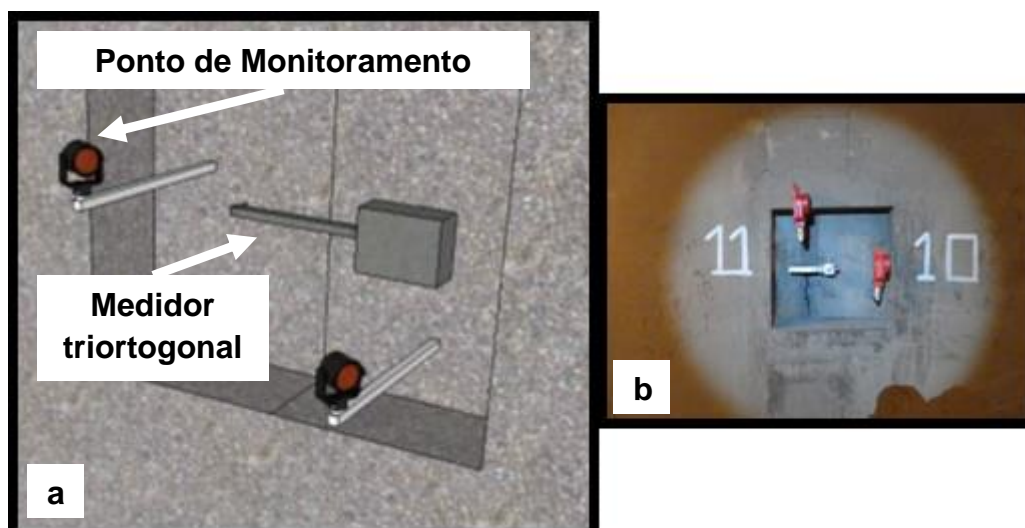


FIGURA 30 - PONTOS DE MONITORAMENTO E MEDIDOR TRIORTOGONAL  
FONTE: SOARES et al (2015)

Durante a coleta da medida de distância, deve-se atentar se o medidor eletrônico de distância está buscando o prisma correto. Isto porque, em razão da distância entre estação e prismas, ocorre uma proximidade aparente entre estes (FIGURA 31) que pode ocasionar uma leitura em um prisma incorreto.

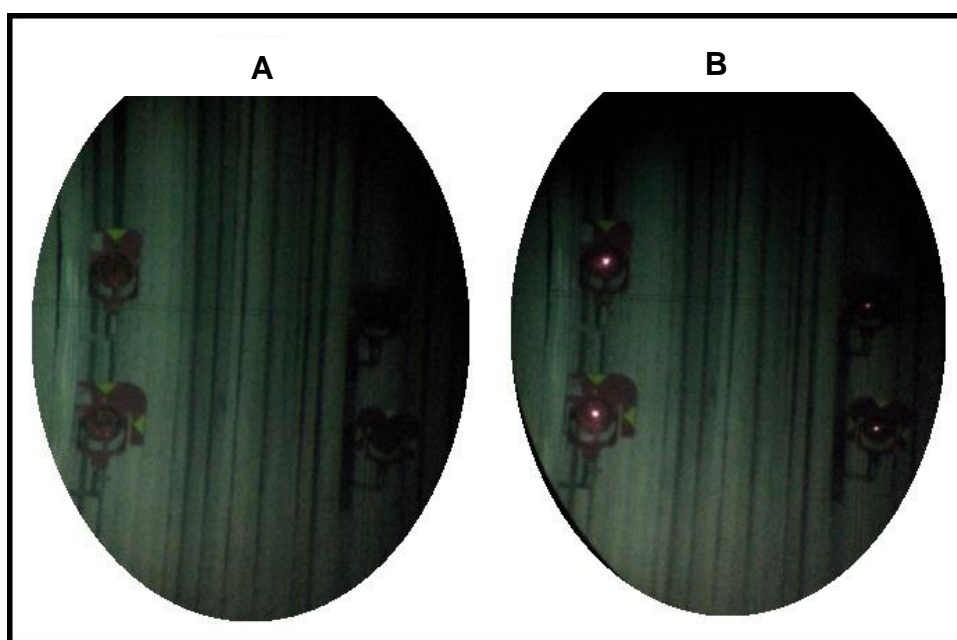


FIGURA 31 - PRISMAS DURANTE A MEDIDA ELETRÔNICA DA DISTÂNCIA  
FONTE: O AUTOR



Na FIGURA 31 (A) é possível observar a pontaria realizada nos prismas posicionados nas hastes de suporte através da ocular da estação total antes do acionamento do medidor eletrônico de distância (MED). Já na FIGURA 31 (B) observa-se o sinal emitido pela estação total sendo refletido simultaneamente pelos quatro prismas. Por isso é possível que a busca automática, utilizada no momento das medições, faça com que o movimento automático da estação total aponte seu MED para o prisma que devolve o sinal de maior intensidade.

Para evitar este problema, na primeira série automática de medidas deve-se acompanhar pela ocular se o MED está apontando para o prisma correto.

### 3.6 IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL

Para a coleta de dados relacionados aos pontos à montante, MSUs, ocupam-se os marcos PG01, PG02, CG01 e CG02. Após orientar a estação total em ré de acordo com cada marco ocupado, efetua-se a pontaria nos pontos de monitoramento. Na FIGURA 32 observa-se o prisma em MSU02 e a estação total no marco geodésico PG01.

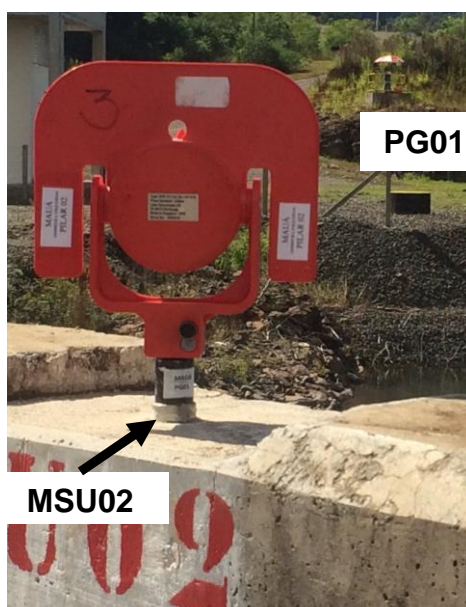


FIGURA 32 - MSU02 E PG01  
FONTE: O AUTOR

No levantamento dos pontos localizados à jusante, os MGEs, instala-se o equipamento no marco PG03 orientando no pilar PG02. Os MGEs são materializados por 62 prismas fixados por parafusos engastados no corpo da barragem (FIGURA 33) e distribuídos conforme croqui apresentado na FIGURA 34.



FIGURA 33 - PRISMA PERMANENTE INSTALADO EM UM MGE  
FONTE: SOARES et al (2015)

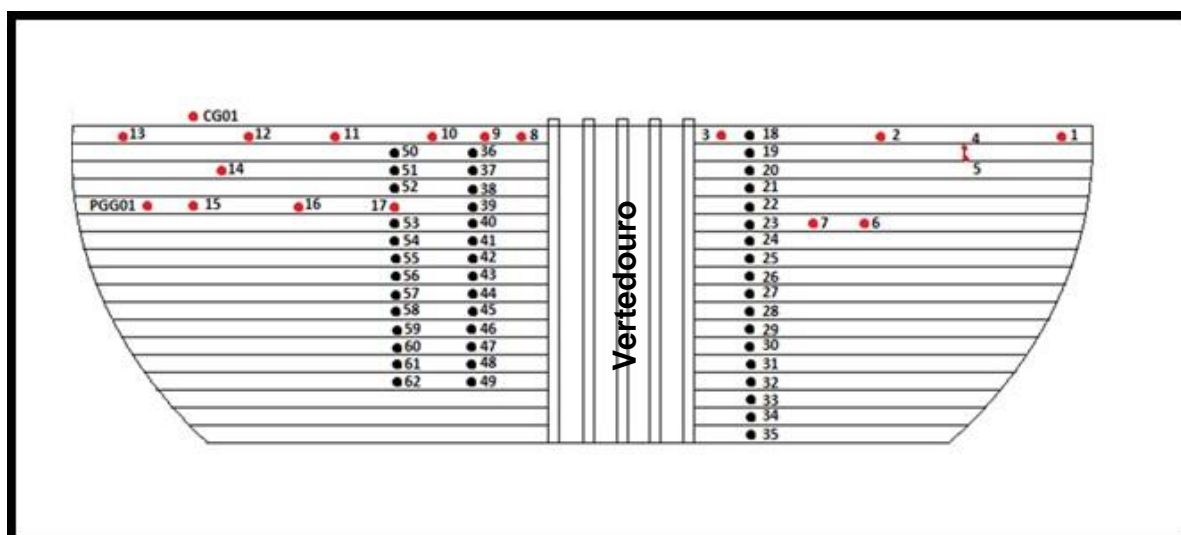


FIGURA 34 - PONTOS DE MONITORAMENTO À JUSANTE  
FONTE: O AUTOR

De forma análoga ao procedimento realizado no levantamento da rede geodésica, utilizam-se as bases nivelantes com alturas fixas e pré-definidas. Também se efetuam nove séries de leituras em pares conjugados, buscando a minimização de erros.

### 3.7 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRIMEIRA ORDEM

Para fins de determinação dos desníveis entre os marcos de superfície (MSUs) e os Pilares PG01 e PG02, utiliza-se o nivelamento geométrico de precisão ou de primeira ordem, cujo erro de fechamento é de  $1\text{mm}\sqrt{k}$ , onde  $k$  é a média das distâncias nivelada e contranivelada, em quilômetros. Isto significa que, para uma seção de 1000m, a diferença máxima tolerável entre nivelamento e contranivelamento é de 1mm (SOARES *et al*, 2012).

A partir do conjunto dos marcos de superfície (MSUs) instalados na base superior do guarda corpo situado a 1,5m da crista da barragem, o nivelamento geométrico de precisão é efetuado concatenando os pilares PG01 e PG02.

Se não houver possibilidade de visualização do código de barras em alguma posição entre os fios superior e inferior, o nível não conseguirá interpretar a imagem e realizar a leitura (FIGURA 35-A). Neste caso, é necessária a modificação da altura do tripé, como na ocasião do levantamento da UHE de Mauá, para que a leitura do código de barras gravado na mira de ínvar seja realizada de forma que os retículos superior, médio e inferior estejam sobre a mira. (FIGURA 35-B).

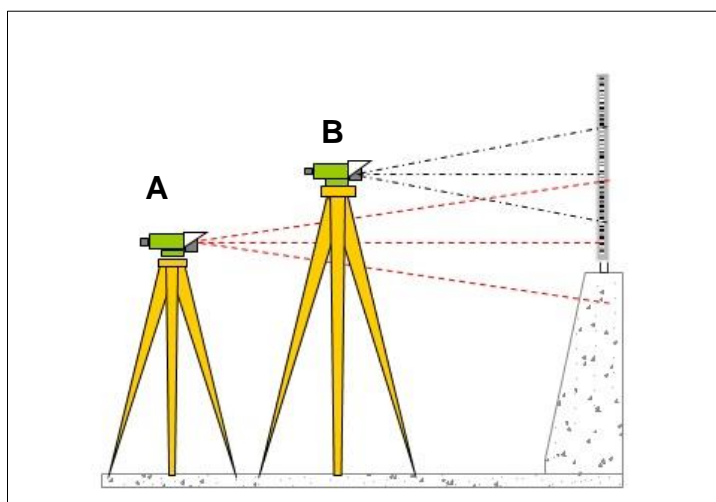


FIGURA 35 - TRIPÉ MODIFICADO  
FONTE: SOARES *et al* (2012)

O tripé precisou ser alongado em marcenaria, a partir de peças que garantam a estabilidade do equipamento no momento das leituras realizadas com as miras

posicionadas sobre as MSUs. Para tanto, substituiu-se a parte interna do tripé por hastes maiores, possibilitando uma altura do nível compatível com a posição da mira, conforme a FIGURA 36.



FIGURA 36 – UTILIZAÇÃO DO TRIPÉ MODIFICADO  
FONTE: O AUTOR

As miras são posicionadas sobre cada uma das MSUs, observando-se sua verticalidade com o uso de sistema de apoio ou bipé preso no extremo superior da mira e desenvolvido especialmente para este projeto (FIGURA 37).



FIGURA 37 - BIPÉ DE APOIO A BALIZA  
FONTE: SOARES *et al* (2012)

Para assegurar a verticalidade da mira, desenvolveu-se um suporte dotado de espelho para a observação da bolha esférica de nivelamento (FIGURA 38).



FIGURA 38 - MIRA E SISTEMA DE ESPELHO  
FONTE: SOARES *et al* (2012)

A partir deste procedimento, o nivelamento geométrico tornou-se possível na UHE de Mauá.

### 3.8 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O sistema desenvolvido nesta pesquisa através da plataforma MATLAB permite a automação do manejo dos dados obtidos a partir do monitoramento da barragem da UHE Mauá. As observações que alimentam o sistema computacional são obtidas a partir dos levantamentos geodésicos espaciais e terrestres, mapeamento geológico e monitoramento da Engenharia Civil. Este sistema computacional realiza os seguintes processos:

- Reduz as coordenadas aproximadas obtidas com levantamento GNSS porque os pontos sobre a superfície terrestre estão sujeitos a deslocamentos oriundos

dos movimentos das placas litosféricas, e a não consideração destes movimentos, pode levar a uma interpretação inadequada de possíveis deslocamentos ocasionados por tais movimentos.

- Infere testes estatísticos para verificação de movimentação da rede geodésica;
- Transforma o sistema de referência para o referencial da barragem;
- Calcula as coordenadas dos pontos do interior da galeria (EGIs) pelo método de poligonação;
- Calcula as coordenadas dos pontos de monitoramento à montante (MSUs) e à jusante (MGEs) pelo método da irradiação;
- Detecta e exclui *outliers*;
- Efetua o ajustamento das observações calculando as coordenadas ajustadas dos pontos da rede e de monitoramento, infere testes estatísticos para verificação de movimentações destes pontos e calcula o coeficiente de correlação, integrando dados geodésicos, geológicos e da engenharia civil.

A seguir são descritos os processos que definem a arquitetura do sistema a partir de um diagrama de fluxo de dados, cujos componentes são explicados a seguir, conforme Rezende (1999).

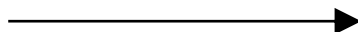
### 3.8.1 Diagrama de fluxo de dados

O diagrama de fluxo de dados mostrado a seguir (FIGURA 39) é utilizado para representar a arquitetura do sistema desenvolvido neste trabalho. Porém, antes da apresentação deste diagrama, cabe explicar alguns detalhes para melhorar seu entendimento:

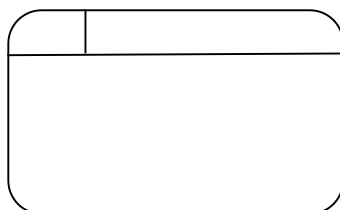
Entidade Externa – Categorias que representam origem ou destino de dados externos ao sistema:



Fluxo de dados – é o meio por onde as informações trafegam. Levam os nomes dos dados:



Processos – são os módulos do sistema onde os dados são transformados ou processados. Levam o nome, número de referência e o processo utilizado:



Depósitos de dados – são locais de armazenamento de dados. Podem ser arquivos separados ou um banco dentro do próprio sistema. Levam o número de referência e o tipo de dados armazenados.



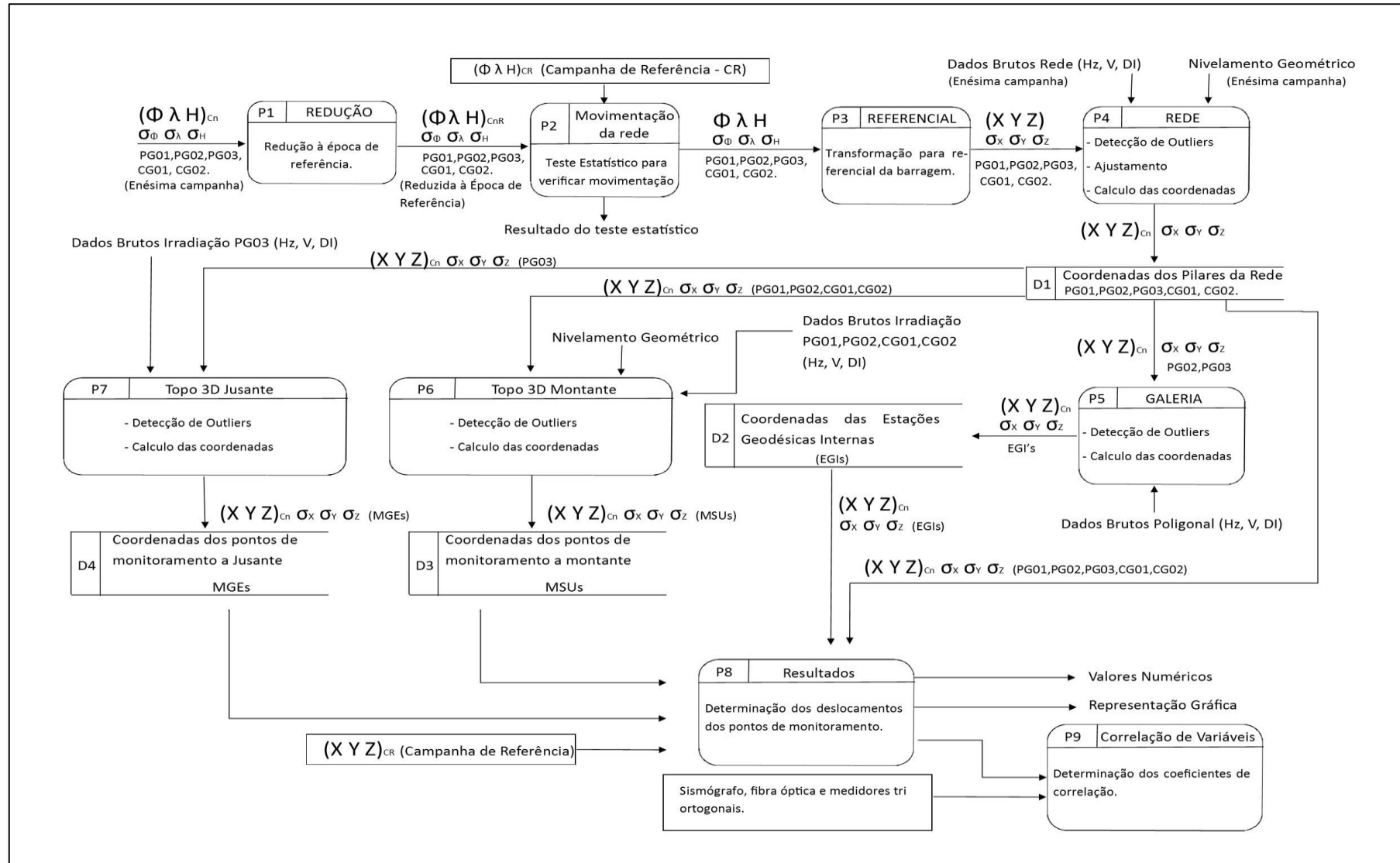


FIGURA 39 - DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS DA ARQUITETURA DO SISTEMA  
 FONTE: O AUTOR



Antes de adentrar na descrição da metodologia empregada na programação, cabe sinalizar as providências que devem ser tomadas em campo e em escritório para a geração dos dados de alimentação dos processos. Uma delas é a posse de dados de uma campanha anterior para fins de referência.

Outra é o rastreamento e processamento atual dos pontos da rede obtidos por meio de levantamento utilizando GNSS. Estas coordenadas dos pilares da rede são processadas com *software* indicado pelo fabricante do equipamento (por exemplo: Leica Geo Office®, Topcon Tools®, Bernese GNSS Software, entre outros).

O diagrama de fluxo de dados para o sistema elaborado é dividido em 9 etapas, chamadas de processos, e são apresentados a seguir, de forma isolada, a fim de compreender como cada um deles funciona.

### 3.8.2 Redução das coordenadas à época de referência

O processo 1 (P1 - FIGURA 40) consiste em reduzir as coordenadas GNSS de uma campanha  $n$  ( $C_n$ ) à uma determinada época usada como referência, utilizando como dados de entrada as coordenadas aproximadas do levantamento atual por GNSS. O programa reduz estas coordenadas por meio do método explicado no item 2.2.1.

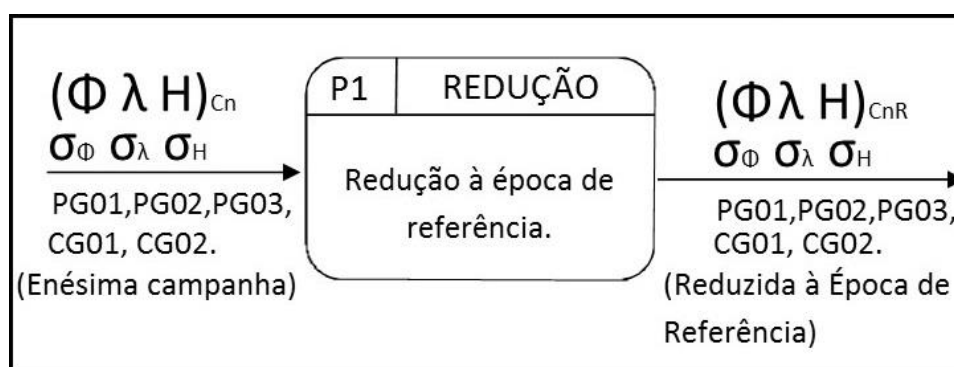


FIGURA 40 - PROCESSO 1: GNSS, REDUÇÃO À ÉPOCA INICIAL  
FONTE: O AUTOR

Onde:

$(\Phi, \lambda \text{ e } H)_{Cn}$  : Coordenadas Geodésicas obtidas na campanha  $n$ ;  
 $(\Phi, \lambda \text{ e } H)_{CnR}$  : Coordenadas Geodésicas reduzidas à época de referência;  
 $(\sigma\Phi, \sigma\lambda \text{ e } \sigma H)$  : Desvios-padrão de cada coordenada.

Após a redução à época de referência, um arquivo de saída é gerado para alimentar o Processo 2.

### 3.8.3 Verificação da estabilidade da rede geodésica

O Processo 2 (P2 - FIGURA 41) consiste em um teste estatístico para verificar se as coordenadas reduzidas à época de referência são diferentes estatisticamente das coordenadas levantadas na época de referência. Os dados de entrada são aqueles obtidos no processo 1, ou seja, as coordenadas dos pilares reduzidas à época de referência.

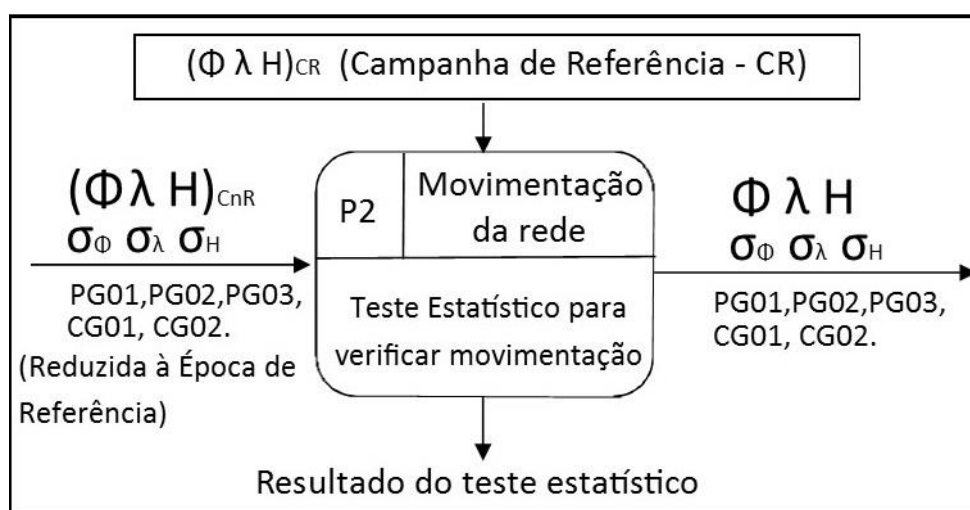


FIGURA 41 - PROCESSO 2: GNSS, VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO  
 FONTE: O AUTOR

Ao realizar o teste de hipóteses, deve-se testar se as coordenadas dos pontos da rede podem ser considerados fixos pela materialização dos pilares  $PG01, PG02$  e  $PG03$  e pelos dispositivos de centragem forçada  $CG01$  e  $CG02$ , dentro do grau de confiança atribuído. Neste trabalho, adota-se o nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e consequente grau de confiança de 95% ( $1-\alpha$ ).

Este teste estatístico e as razões para a redução à época de referência foram explicados no item 2.2.2 da revisão de literatura. Se as coordenadas do levantamento atual forem iguais estatisticamente às coordenadas da campanha de referência, o processo seguinte será alimentado com as coordenadas da campanha de referência. Se forem estatisticamente diferentes, o processo 3 será alimentado com as coordenadas do levantamento atual. A partir deste processo, não é mais representada a campanha, pois já foi definida a qual será utilizada.

### 3.8.4 Transformação para o referencial da barragem

O Processo 3 (P3 - FIGURA 42) consiste na transformação das coordenadas fornecidas na saída do processo 2 para o sistema de barragem, aplicando-se o modelo matemático descrito no item 2.2.3.

Isto é necessário porque os dados provenientes de monitoramento de barragens são utilizados, muitas vezes, por profissionais de áreas distintas da Engenharia Cartográfica. Por isso, a transformação para um sistema de referência local, com um dos eixos coincidindo com o alinhamento da barragem, torna mais clara a verificação de deslocamentos, uma vez que são apresentados no sistema cartesiano ( $X_B$ ,  $Y_B$  e  $Z_B$ ).

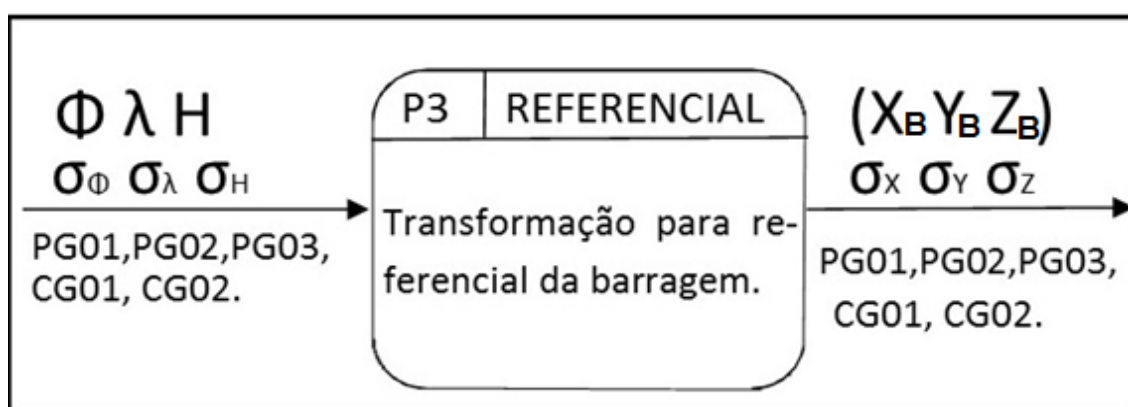


FIGURA 42 - PROCESSO 3: GNSS, TRANSFORMAÇÃO DE REFERENCIAL  
FONTE: O AUTOR

Concluído este processo, o resultado será um arquivo interno contendo as coordenadas cartesianas tridimensionais (XB, YB e ZB) referenciadas ao sistema da barragem.

Estas coordenadas são utilizadas como coordenadas iniciais (ou provisórias) na realização do ajustamento citado no próximo processo.

### 3.8.5 Ajustamento de observações e detecção de *outliers*

O Processo 4 (P4 - FIGURA 44) é a etapa que trabalha com o ajustamento e detecção de *outliers*. Além das coordenadas dos pontos da rede no sistema da barragem, são utilizados também os dados de direções horizontais, ângulos verticais e distância inclinada obtidos com Estação Total.

A FIGURA 43 ilustra a rede no sistema de barragem com os elementos que originam as equações envolvidas no ajustamento.

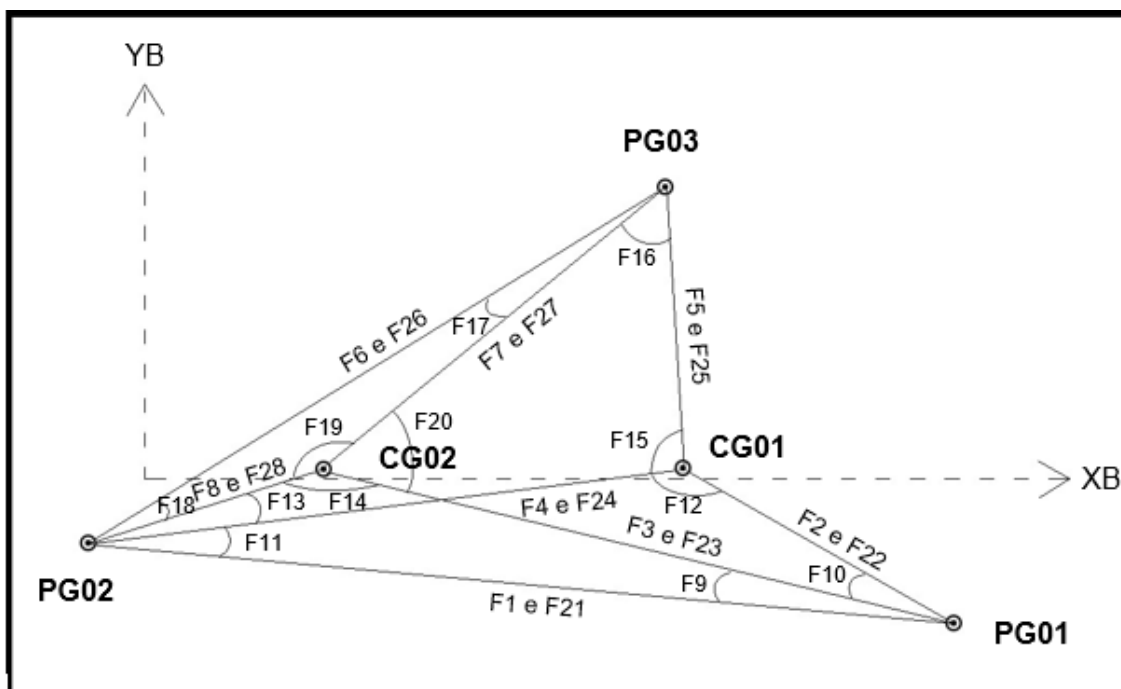


FIGURA 43 - CONFIGURAÇÃO DA REDE  
FONTE: O AUTOR

As equações F1 a F8 são relativas às distâncias entre os pilares e são originadas a partir da aplicação da equação (32), as equações F9 a F20 são relativas aos ângulos horizontais internos e são originadas a partir da equação (36) e as equações F21 a F28 são relativas aos ângulos Zenitais e são originadas a partir da equação (38).

As equações 41, 42 e 43, a seguir, são exemplos de distância, ângulo horizontal e ângulo zenital, respectivamente. A nomenclatura dos pilares é abreviada, sendo PG01 = 1, PG02 = 2 e CG02 = 3.

$$F1: D_{1-2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1 + hs - hi)^2} \quad (41)$$

$$F9: HZ_{2-1-3} = \tan^{-1}\left(\frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (42)$$

$$F21: z_{1-2} = \cos^{-1}\left(\frac{(z_2 - z_1 + hs - hi)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1 + hs - hi)^2}}\right) \quad (43)$$

Assim, definido o modelo matemático funcional, a matriz das observações aproximadas (Lb) é montada a partir das equações deste modelo:

$$Lb = [F1 \ F2 \ F3 \ F4... \ F27 \ F28]^T \quad (44)$$

A matriz das derivadas parciais “A”:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F1}{\partial x_{PG01}} & \frac{\partial F1}{\partial y_{PG01}} & \frac{\partial F1}{\partial z_{PG01}} & \frac{\partial F1}{\partial x_{PG02}} & \dots & \frac{\partial F1}{\partial z_{CG02}} \\ \frac{\partial F2}{\partial x_{PG01}} & \frac{\partial F2}{\partial y_{PG01}} & \frac{\partial F2}{\partial z_{PG01}} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F28}{\partial x_{PG01}} & \frac{\partial F28}{\partial y_{PG01}} & \frac{\partial F28}{\partial z_{PG01}} & \frac{\partial F28}{\partial x_{PG02}} & \dots & \frac{\partial F28}{\partial z_{CG02}} \end{bmatrix} \quad (45)$$

A matriz dos pesos “P” é diagonal, sendo cada elemento o inverso da variância das observações:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_d} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & \ddots & & \vdots & \\ 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{Hz}} & \dots & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_z} \end{bmatrix} \quad (46)$$

A matriz das correções é calculada em função das coordenadas aproximadas ajustadas dos pontos PG01, PG03, CG01 e CG02. Este ajustamento é realizado aplicando-se o método paramétrico

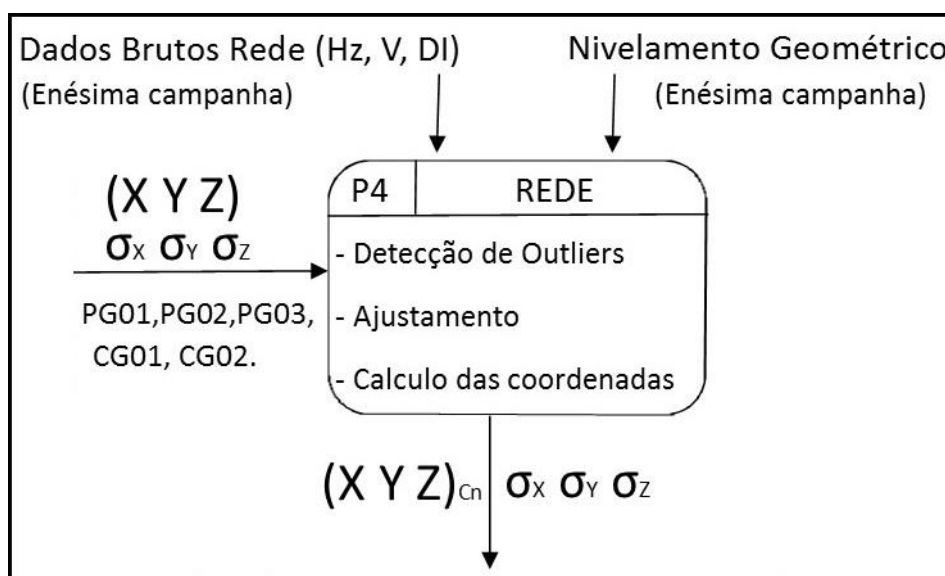


FIGURA 44 - PROCESSO 4: REDE  
FONTE: O AUTOR

Este processo é alimentado com as coordenadas iniciais de cada ponto transformadas no sistema de barragem, resultantes do processo P3, com os dados brutos da estação total e com os dados de condições atmosféricas (temperatura, pressão e umidade relativa do ar).

Assim, este processo é utilizado para detecção de *outliers* nas observações da estação total e para correções das distâncias referentes aos fatores ambientais, além de realizar o ajustamento das coordenadas de acordo com o apresentado no subitem 2.2.4.2.

Os dados de saída são as coordenadas tridimensionais ajustadas, reduzidas à época de referência e referenciadas ao sistema da barragem. Estes marcos formam a rede geodésica de monitoramento, materializada conforme apresentado no item 2.2. O resultado é um arquivo em formato .txt fornecido ao Depósito de Dados<sup>4</sup> 1.

#### 3.8.5.1 Depósito de dados 1 (D1)

Este é o arquivo de saída do processo 4 (FIGURA 45) que armazena as coordenadas tridimensionais ajustadas e reduzidas a uma época de referência dos marcos da rede geodésica da barragem.

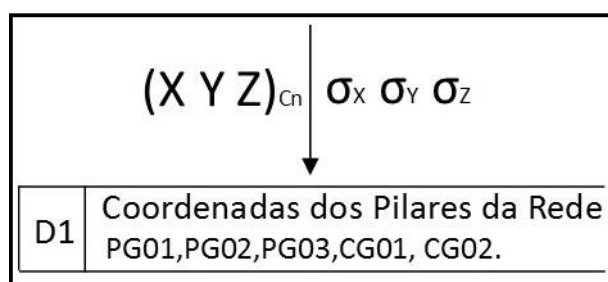


FIGURA 45 - DEPÓSITO DE DADOS 1  
FONTE: O AUTOR

Além de permitir uma consulta externa das coordenadas, este depósito também fomenta os próximos processos.

#### 3.8.6 Poligonação

Este processo (P5 - FIGURA 46) consiste na poligonação. São consideradas as coordenadas dos pontos da rede geodésica ocupados para orientação da poligonal que percorre o interior da galeria superior de inspeção.

---

<sup>4</sup> Os depósitos de dados são formas de armazenamento que permitem a consulta externa e alimentam as etapas subsequentes.

Este processo determina as coordenadas dos pontos de monitoramento no interior da galeria a partir dos pontos da poligonal.

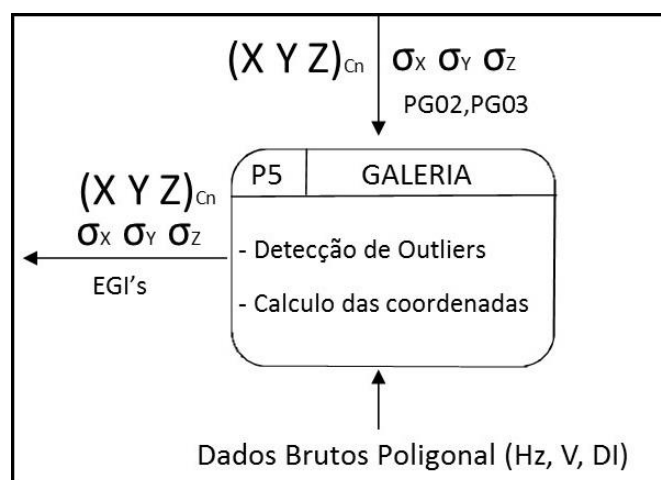


FIGURA 46 - PROCESSO 5: GALERIA  
FONTE: O AUTOR

Os dados de entrada são as coordenadas ajustadas dos pontos da rede geodésica no sistema de barragem, direções horizontais, ângulos verticais e distância inclinada obtidos a partir da poligonação.

Os parâmetros ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar) são considerados para realização da correção de cada medida de distância, além da detecção de *outliers* nas observações nos mesmos moldes do Processo 4.

O resultado deste processo são as coordenadas das Estações Geodésicas Internas (EGIs), utilizadas para a verificação de deslocamentos, armazenados no depósito de dados 2.

#### 3.8.6.1 Depósito de dados 2 (D2)

O arquivo de saída do processo 5 (FIGURA 47) armazena as coordenadas das Estações Geodésicas Internas.



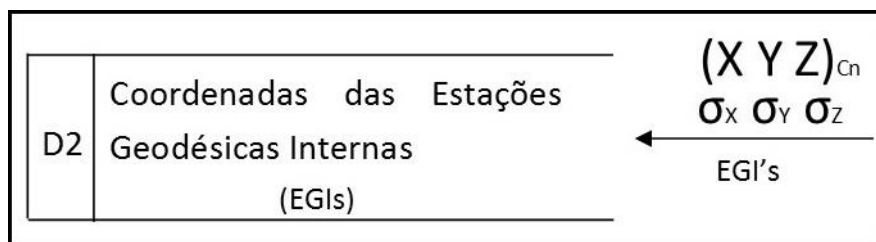


FIGURA 47 - DEPÓSITO DE DADOS 2: COORDENADAS DAS EGI'S  
FONTE: O AUTOR

### 3.8.7 Irradiação – Determinação dos MSUs

O processo 6 (P6 - FIGURA 48) consiste no cálculo da irradiação tridimensional que determina as coordenadas tridimensionais dos pontos de monitoramento externos, situados na crista, à montante. Recebem o nome de Marcos de Superfície (MSUs).

Os dados de entrada são as coordenadas dos pilares ocupados para realização da irradiação, armazenados no depósito de dados 1. São utilizadas as leituras de direções horizontais, ângulos verticais e distância inclinada, com atenção aos dados ambientais e verificação da existência de *outliers*. Realizam-se os cálculos conforme descrito no item 2.4, a partir dos pontos PG01, PG02 e CG01 e CG02.

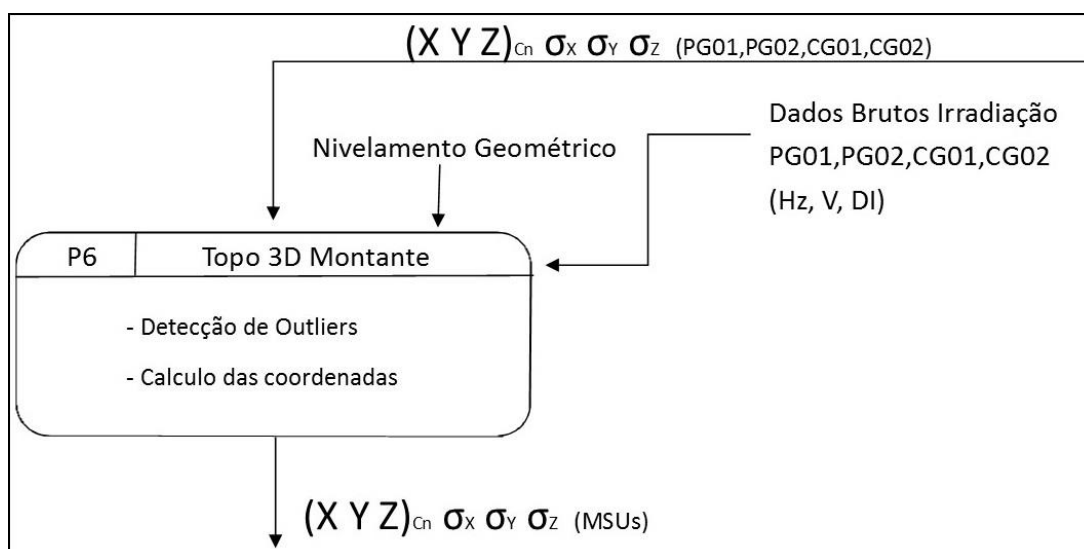


FIGURA 48 - PROCESSO 6: TOPO3D MONTANTE  
FONTE: O AUTOR

Na (FIGURA 49) observam-se os croquis das visadas a partir dos pontos PG01 e PG02 (sobre o lago) e visadas a partir de CG01 e CG02 (fora da influência da refração provocada pela água do reservatório). Como as visadas realizadas sobre o lago sofrem influência da alteração dos parâmetros ambientais encontrados entre a água e o ar, além do cálculo das coordenadas a partir dos pontos PG01 (FIGURA 49-a) e PG02 (FIGURA 49-b) (sob influência) é possível a determinação destas mesmas coordenadas a partir de dois pontos fora da influência da refração da água. Os pontos CG01 e CG02 (FIGURA 49-c) situam-se na crista da barragem, à jusante, e as visadas são realizadas sobre a pista de rolamento.

Os parâmetros ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar) são considerados para realização da correção de cada medida de distância como acontece nos processos anteriores. Realiza-se a detecção de *outliers* nas observações nos mesmos moldes do Processo 4.

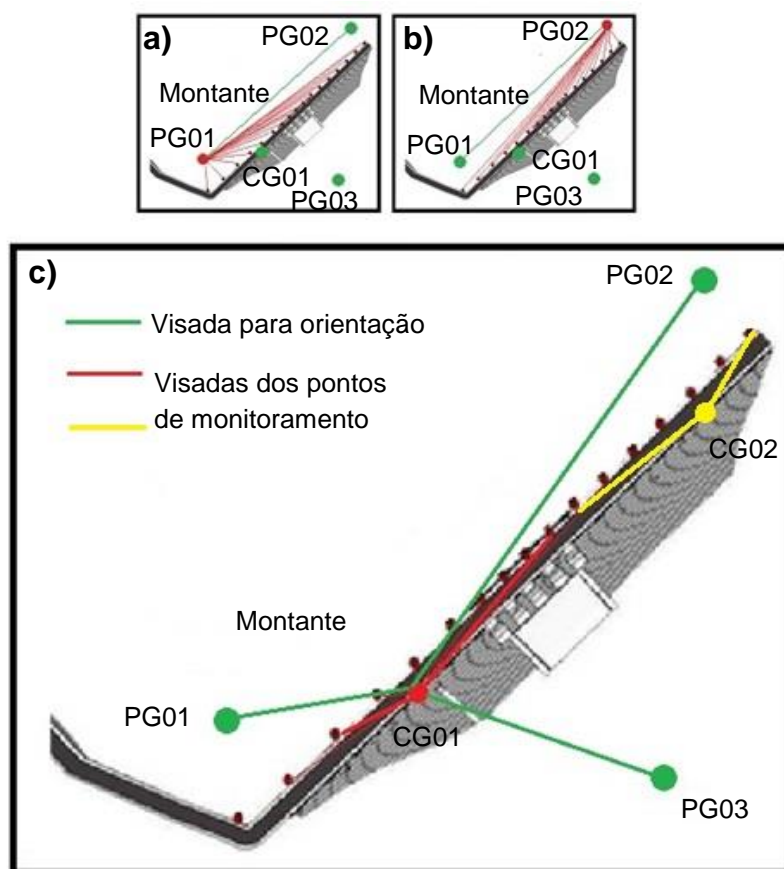


FIGURA 49 - CROQUI INDICANDO AS LINHAS DE VISADA DA IRRADIAÇÃO 3D  
FONTE: ADAPTADO DE SIGUEL (2013)

O resultado do processo são as coordenadas dos pontos localizados sobre a crista da barragem, a montante, ou seja, os Marcos de Superfície (MSUs).

### 3.8.7.1 Depósito de dados 3 (D3)

O depósito de dados 3 (FIGURA 50) é o arquivo de saída do processo 6, que armazena as coordenadas dos MSUs.

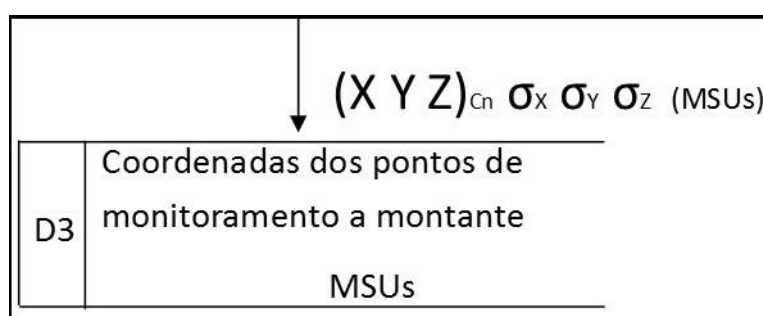


FIGURA 50 - DEPÓSITO DE DADOS 3: COORDENADAS DOS MSUs  
FONTE: O AUTOR

### 3.8.8 Irradiação – Determinação dos MGEs

O processo 7 (P7 - FIGURA 51) efetua o cálculo da irradiação utilizado no processo 6, porém, o marco ocupado pelo equipamento é o PG03 e os pontos visados são aqueles localizados no corpo da barragem, à jusante.

Os dados de entrada são as coordenadas armazenadas no depósito de dados 1, as leituras de direções horizontais, ângulos verticais, distâncias inclinadas e os dados ambientais.

Como nos processos anteriores, realizam-se as correções de distâncias em função dos parâmetros ambientais e detecção de *outliers*, nos mesmos moldes do Processo 4.

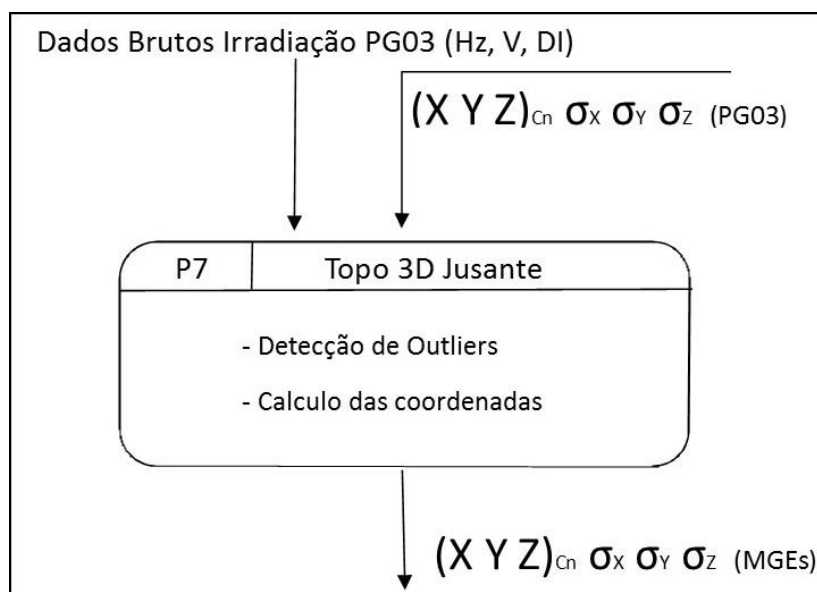


FIGURA 51 - PROCESSO 7: TOPO3D: JUSANTE  
FONTE: O AUTOR

O resultado do processo é armazenado no depósito de dados 4 (FIGURA 52), e consiste nas coordenadas dos pontos situados à jusante da barragem, chamados de MGEs.

#### 3.8.8.1 Depósito de dados 4 (D4)

O depósito de dados 4 (FIGURA 52) é o arquivo de saída do processo 7, que armazena as coordenadas dos MGEs.

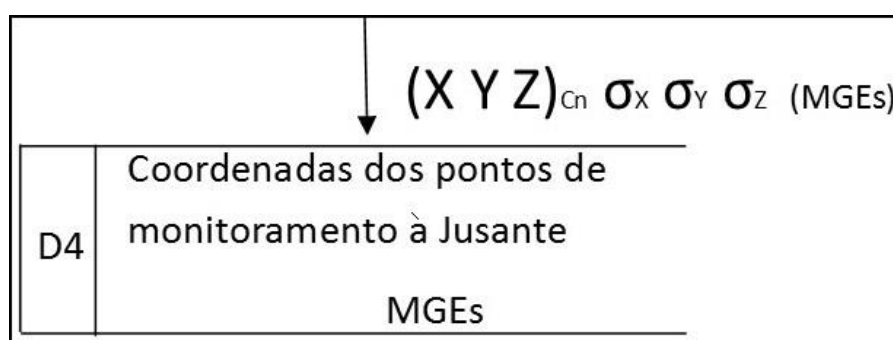


FIGURA 52 - DEPÓSITO DE DADOS 4: COORDENADAS DOS MGEs  
FONTE: O AUTOR

### 3.8.9 Verificação de deslocamentos

Neste processo (P8 - FIGURA 53) calculam-se os deslocamentos dos pontos utilizando os resultados obtidos nos processos anteriores e o teste estatístico do Processo 2.

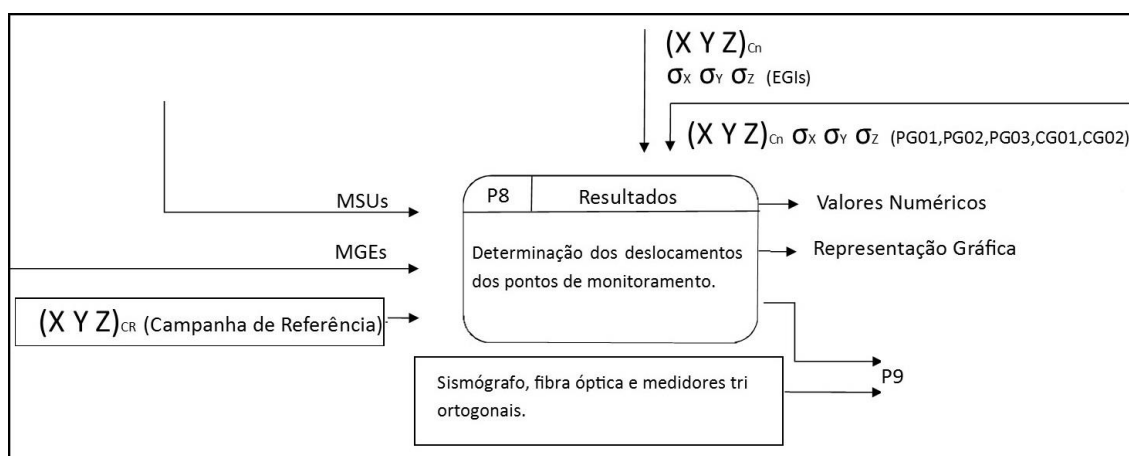


FIGURA 53 - PROCESSO 8: RESULTADOS  
FONTE: O AUTOR

Os resultados do processo 8 são disponibilizados de duas formas. Uma delas em planilhas contendo os valores numéricos para análises quantitativas. A outra é a representação gráfica dos vetores resultantes e suas elipses de erro, possibilitando ao usuário observar os locais onde estão ocorrendo os maiores deslocamentos e encaminhar, se for o caso, as providências cabíveis.

### 3.8.10 Integração de dados de monitoramento geodésico, geológico e da engenharia civil

No processo 9 (P9 - FIGURA 54) são calculados os coeficientes de correlação, conforme item 2.5.4. Neste momento integram-se os resultados obtidos pelas diferentes modalidades de monitoramento, ou seja, os resultados de levantamentos geodésicos, geológicos e da Engenharia Civil.

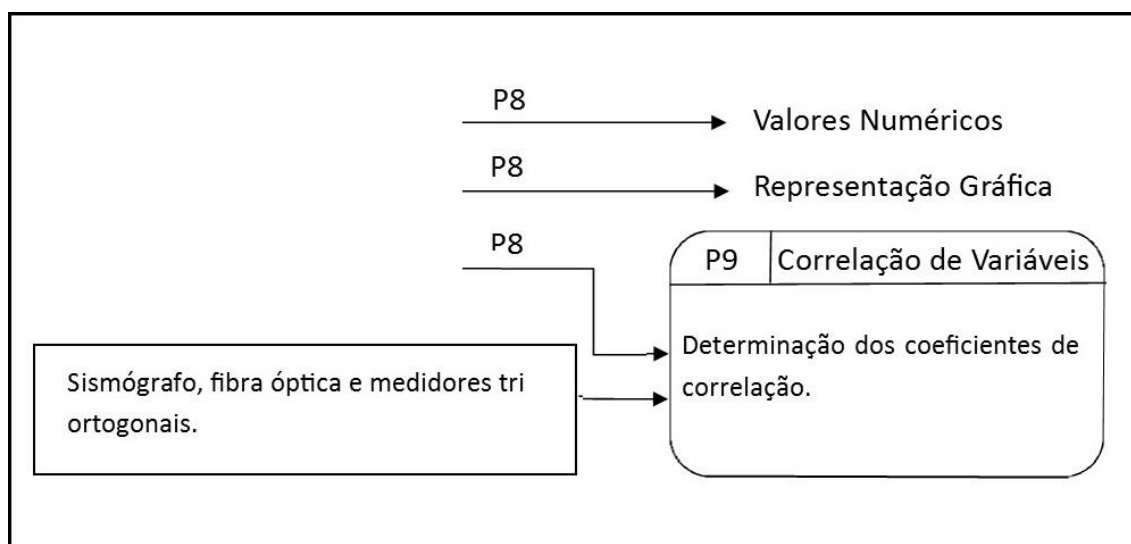


FIGURA 54 - PROCESSO 9: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  
 FONTE: O AUTOR

Os resultados são expostos na forma de matriz de correlação entre as diferentes variáveis submetidas à verificação. Cabe salientar que, conforme exposto no item 5.1, alguns fatores inviabilizaram a execução deste processo.

## 4 RESULTADOS

Os resultados expostos nesta seção referem-se à demonstração do funcionamento do sistema desenvolvido, os valores numéricos e a análise da rede geodésica e dos pontos monitorados na UHE Mauá, a partir de observações de dois levantamentos denominados de campanha 15 e 16.

### 4.1 VERIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS DA REDE GEODÉSICA

O sistema trabalha com coordenadas cartesianas e, por esse motivo, o primeiro passo é a transformação das coordenadas iniciais dos pontos da rede obtidas por GNSS para o sistema geodésico cartesiano tridimensional. Caso seja feita a opção por não utilizar as coordenadas obtidas por GNSS, não será realizada a verificação da movimentação regional dos pontos e consequentemente serão sempre utilizadas as mesmas coordenadas iniciais no ajustamento. Na FIGURA 55 observa-se o menu Definição de Referencial selecionado.



FIGURA 55 – MENU DEFINIÇÃO DE REFERENCIAL  
FONTE: O AUTOR

Os dados de entrada são as coordenadas dos pontos da rede, obtidos por GNSS. Na FIGURA 56 observa-se a transformação para o sistema geodésico cartesiano.

The screenshot displays the 'Geodesico\_para\_XYZ' application window. It features several sections for data entry and transformation parameters.

**Coordenadas Geodésicas em GRAUS DECIMAIS**  
**Coordenadas de Entrada**

	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Altitude (m)
PG01	-24.0336773000000	-50.4216218000000000	6.433360000000000e+02
PG02	-24.0356468000000	-50.4232324000000000	6.546170000000000e+02
PG03	-24.0337200000000	-50.4232319000000000	5.667210000000000e+02
MSU17	-24.0354079100000	-50.4233112400000000	6.389540000000000e+02
CG01	-24.0346993300000	-50.4224620100000000	6.392200000000000e+02
CG02			

**Coordenadas de Saída**  
**Coordenadas Geodésicas Cartesianas**

	X (m)	Y (m)	Z (m)
PG01	3690674.39662724	-4510090.77992258	-2584636.99146610
PG02	3690372.25786554	-4510195.70163041	-2585194.93470795
PG03	3690487.34569794	-4510336.13336852	-2584626.72200965
MSU17	3690364.94326061	-4510221.93667984	-2585121.43127249
CG01	3690654.75861346	-4510197.23988867	-2584753.88716505
CG02			

**Coordenadas no Sistema da Barragem**

	X <sub>B</sub> (m)	Y <sub>B</sub> (m)	Z <sub>B</sub> (m)
PG01			
PG02			
PG03			
MSU17			
CG01			
CG02			

**Parâmetros do Elipsoide**  
 Valor Padrão: SIRGAS2000

Semi-eixo Maior: 6378137

Achatamento: 1/ 298.257222101

**Parâmetros de Transformação**

	Valores
Kappa	58.1
Phi	-2.0000e
Omega	
Escala	
Tx	-50.8
Ty	-57.5
Tz	15.6

**Comandos**

Transformar para XYZ

Salvar Coordenadas no SB

FIGURA 56 – TRANSFORMAÇÃO PARA SISTEMA GEODÉSICO CARTESIANO

FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 57, observa-se a seleção do menu Geodésia – GPS – Redução à Época Inicial.





FIGURA 57 – MENU GPS – REDUÇÃO À ÉPOCA INICIAL  
FONTE: O AUTOR

Conforme descrito no item 2.2.1 a respeito da redução das coordenadas para determinada época, o sistema reduz as coordenadas iniciais para a época de referência (FIGURA 58), para verificar a igualdade estatística das coordenadas nas duas épocas.

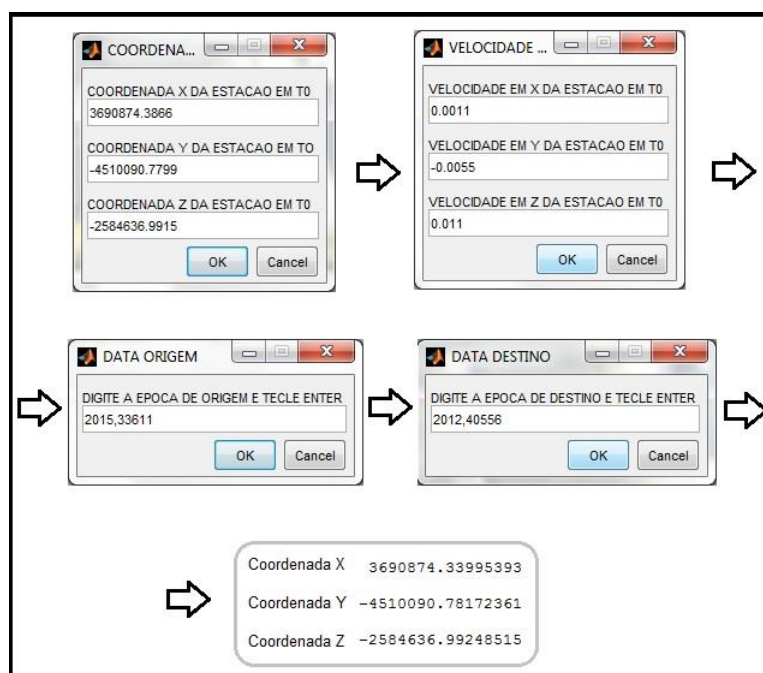


FIGURA 58 – REDUÇÃO À ÉPOCA DE REFERÊNCIA  
FONTE: O AUTOR

A época de origem ( $T_0$ ) refere-se às coordenadas atuais a serem reduzidas e a época de destino refere-se às coordenadas de referência. Os resultados são coordenadas tridimensionais cartesianas reduzidas à época de referência.

Após a redução, as coordenadas geodésicas cartesianas são transformadas para o sistema local, chamado de sistema de barragem (FIGURA 59).

**Geodesico\_para\_XYZ**

**Coordenadas Geodésicas em GRAUS DECIMAIS**  
**Coordenadas de Entrada**

	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Altitude (m)
PG01	-24.0336773000000	-50.4218180000000	6.4330600000000
PG02	-24.0356480000000	-50.4232024000000	6.5461700000000
PG03	-24.0337200000000	-50.4232319000000	5.8872100000000
MSU17	-24.0354079100000	-50.4233112400000	6.3895400000000
CG01	-24.0340993300000	-50.42246	-50.4304620100000
CG02			

**Coordenadas de Saída**  
**Coordenadas Geodésicas Cartesianas**

	X (m)	Y (m)	Z (m)
PG01	3690874.3662724	-4510090.77919510090	77992250.2584636993466
PG02	3690372.25786554	-4510195.70163041	2585194.934707
PG03	3690487.34569794	-4510336.13319510336	13336853.2584626792086
MSU17	3690364.94326061	-4510221.93667984	2585121.434272
CG01	3690654.75861346	-4510197.23919510197	23988867.2584753887165
CG02			

**Coordenadas no Sistema da Barragem**

	XB (m)	YB (m)	ZB (m)
PG01	703.8909	-126.2354	4.35
PG02	-50.8282	-57.5820	15.66
PG03	453.6264	253.6847	-50.26
MSU17	7.5089e-07	-1.1843e-06	-4.3131e
CG01	468.6528	7.4848	0.24
CG02			

**Parâmetros do Elipsoide**  
**Valor Padrão: SIRGAS2000**

Semieixo Maior: 6378137  
 Achatamento: 1/ 298.257222101

**Parâmetros de Transformação**

	Valores
Kappa	58.1
Phi	-2.0000e
Omega	
Escala	
Tx	-50.8
Ty	-57.5
Tz	15.6

**Comandos**

Transformar para XYZ  
 Salvar Coordenadas no SB

FIGURA 59 – TRANSFORMAÇÃO PARA O SISTEMA DE BARRAGEM  
 FONTE: O AUTOR

As coordenadas reduzidas no sistema local estão prontas para o teste estatístico para verificação de igualdade, conforme descrito no item 2.2.2. Estes arquivos são armazenados em formato ASCII e devem ser recarregados toda vez que forem utilizados. O sistema não utiliza banco de dados.

Na sequência, inserem-se os dados obtidos por levantamento terrestre, como por exemplo, os dados do nivelamento geométrico, conforme FIGURA 60.



FIGURA 60 – MENU NIVELAMENTO GEOMÉTRICO  
FONTE: O AUTOR

No menu Geodésia – Nivelamento Geométrico, é aberta a janela (FIGURA 61) na qual se inserem as leituras realizadas no nivelamento geométrico. O sistema calcula o desnível e armazena em arquivo ASCII, conforme descrito anteriormente.

**Caderneta Nivelamento Geométrico**

Montar Caderneta      Arquivo Aberto: Nenhum      Nova Caderneta

Adicionar Nova Linha

Salvar Alterações

Calcular

Zerar Campos

**Precisão em mm**

1    \* sqrt(k)

**em metros**

	Nivelamento	Contra	Soma
Distância			
Desnível			

Média do desnível em módulo

Média das distâncias

**Qualidade do Nivelamento Geométrico**

Erro Cometido (mm):      Erro Permitido (mm):

FIGURA 61 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO  
FONTE: O AUTOR

Após os cálculo dos desníveis entre todos os pontos MSUs tendo como referência a coordenada Z do pilar PG01, são calculadas as coordenadas dos pontos MSUs, nas campanhas 15 e 16, respectivamente. No QUADRO 4 são expostas as coordenadas com os desvios-padrão.

CAMPANHA 15			CAMPANHA 16		
Estação:	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO		Estação:	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	
	Z (m)	$\sigma$ (mm)		Z (m)	$\sigma$ (mm)
MSU1	0,1731	0,25	MSU1	0,1726	0,25
MSU2	0,1699	0,17	MSU2	0,1692	0,17
MSU3	0,1676	0,18	MSU3	0,1674	0,18
MSU4	0,1642	0,15	MSU4	0,1640	0,15
MSU5	0,1667	0,12	MSU5	0,1648	0,12
MSU6	0,1670	0,15	MSU6	0,1652	0,15
MSU7	0,1615	0,12	MSU7	0,1584	0,12
MSU8	0,1621	0,14	MSU8	0,1591	0,14
MSU9	0,1601	0,15	MSU9	0,1565	0,15
MSU10	0,1632	0,10	MSU10	0,1598	0,10
MSU11	0,1666	0,06	MSU11	0,1633	0,06
MSU12	0,1643	0,19	MSU12	0,1608	0,19
MSU13	0,1631	0,12	MSU13	0,1599	0,12
MSU14	0,1709	0,15	MSU14	0,1663	0,15
MSU15	0,1696	0,13	MSU15	0,1648	0,13
MSU16	0,1724	0,11	MSU16	0,1676	0,11
MSU17	0,1702	0,15	MSU17	0,1657	0,15

QUADRO 4 - COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHAS 15 e 16  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 5, a partir do teste estatístico comparam-se os desníveis dos MSUs, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se os desníveis são, estatisticamente, iguais ou diferentes nas duas campanhas, dentro de um grau de confiança de 95%. A análise destas diferenças estatísticas é apresentada ao final do subitem 4.2.2.

CAMPANHA 16 - CAMPANHA 15		
Estação:	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	TESTE ESTATÍSTICO
	Z (mm)	Z
MSU1	-0,50	DIFERENTE
MSU2	-0,65	DIFERENTE
MSU3	-0,20	IGUAL
MSU4	-0,15	IGUAL
MSU5	-1,85	DIFERENTE
MSU6	-1,80	DIFERENTE
MSU7	-3,10	DIFERENTE
MSU8	-2,90	DIFERENTE
MSU9	-3,50	DIFERENTE
MSU10	-3,35	DIFERENTE
MSU11	-3,20	DIFERENTE
MSU12	-3,45	DIFERENTE
MSU13	-3,15	DIFERENTE
MSU14	-4,50	DIFERENTE
MSU15	-4,75	DIFERENTE
MSU16	-4,75	DIFERENTE
MSU17	-4,45	DIFERENTE

QUADRO 5 - COMPARAÇÃO DAS COORDENADAS “Z” DA REDE ENTRE DUAS CAMPANHAS  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 62, inserem-se as observações obtidas com estação total. No caso deste trabalho, o sistema é desenvolvido para equipamentos da fabricante Leica. Futuramente, o sistema deve ser implementado para aceitar dados de equipamentos de outros fabricantes.

No menu Geodésia – Dados – Converter Formato Leica, convertem-se os dados da estação total armazenados em formato de máscara do Posição para o formato específico utilizado pelo sistema.



FIGURA 62 – INSERIR DADOS BRUTOS DA ESTAÇÃO TOTAL  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 63, ao selecionar o modelo da estação total, TCRA1205 ou TS15, os dados nela armazenados são carregados no sistema. O número de pontos e o número de séries são informados manualmente.



**CONVERSÃO DE FORMATO**

	Ângulos Horizontais	Ângulos Verticais	Distâncias Inclínadas
1			
2			
3			
4			

**Número de pontos (Não contar com o ponto de ré para a Irradiação)**

Número de Pontos:

Número de Séries:

Adicionar cabeçalho

TS15 1205

SALVAR

FIGURA 63 – CONVERSÃO DE FORMATOS  
FONTE: O AUTOR

Foi necessário implementar uma rotina para fazer a varredura do arquivo no formato Posição e alocar cada informação no local correto para a leitura do programa. O problema em se fazer essa varredura, é que a ordem de armazenamento dos dados pela estação total segue um padrão não sequencial no momento em que realiza as leituras em posição inversa, ou seja, na primeira série em posição direta são observados os pontos 01 a 09, em posição inversa são observados os pontos 09 a 01. Quando é iniciada a segunda série, voltam as leituras em PD e PI, e assim sucessivamente até o final de todas as séries.

Portanto, é necessário montar essas leituras inicialmente em ordem crescente e depois inverter os contadores para montá-las em ordem decrescente.

Os dados da estação fornecidos ao sistema são observados na FIGURA 64.

**CONVERSÃO DE FORMATO**

Número de pontos (Não contar com o ponto de ré para a Irradiação)

	Ângulos Horizontais	Ângulos Verticais	Distâncias Inclinaadas
1	1.0000e-04	89.0916	757.9170
2	24.2517	90.5331	270.5740
3	8.2354	90.2537	567.2620
4	188.2353	269.3421	567.2620
5	204.2515	269.0629	270.5740
6	179.5960	270.5042	757.9170
7	0	89.0917	757.9170
8	24.2517	90.5332	270.5740
9	8.2354	90.2539	567.2620
10	188.2353	269.3422	567.2620
11	204.2516	269.0630	270.5740
12	180	270.5042	757.9170
13	1.0000e-04	89.0916	757.9170
14	24.2519	90.5330	270.5740
15	8.2354	90.2538	567.2620
16	188.2352	269.3422	567.2620
17	204.2517	269.0630	270.5740
18	180.0002	270.5044	757.9170
19	1.0000e-04	89.0916	757.9170
20	24.2517	90.5331	270.5740
21	8.2355	90.2537	567.2620
22	188.2352	269.3421	567.2620
23	204.2517	269.0629	270.5740
24	180.0001	270.5043	757.9160
25	2.0000e-04	89.0917	757.9170
26	24.2517	90.5331	270.5740
27	8.2354	90.2538	567.2620
28	188.2355	269.3421	567.2620

Número de Pontos: 3

Número de Séries: 9

Adicionar cabeçalho

TS15 1205

**SALVAR**

FIGURA 64 – DADOS DA ESTAÇÃO TOTAL INSERIDOS NO SISTEMA  
FONTE: O AUTOR

O formato do sistema é denominado gsi2, armazenado separadamente, porque, conforme já explicado, o sistema não trabalha com banco de dados. O exemplo encontra-se na FIGURA 65.

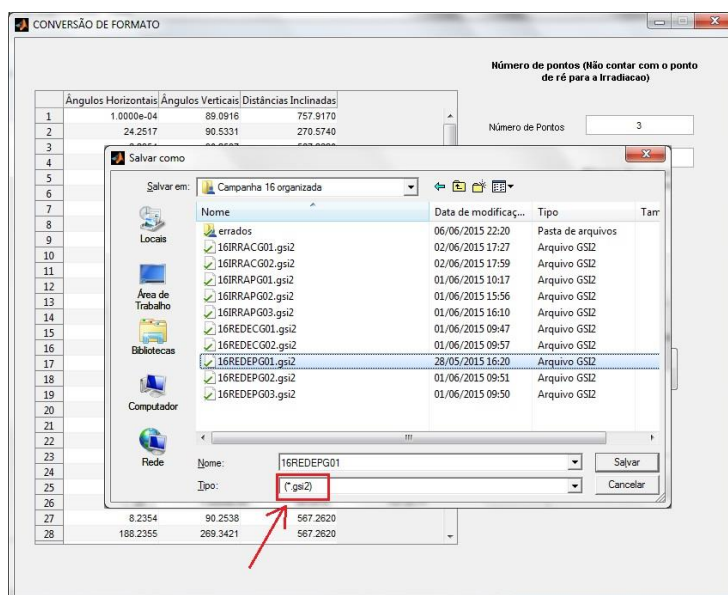


FIGURA 65 – ARQUIVO .GSI2 INTERNO DO SISTEMA  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 66, observa-se o menu Geodésia – Rede – Topografia. Neste menu, carregam-se as coordenadas GNSS reduzidas à época de referência (conforme FIGURA 58), os dados obtidos com nivelamento geométrico e estação total, no formato .gsi2.



FIGURA 66 – MENU GEODÉSIA – REDE - TOPOGRAFIA  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 67 observa-se a seleção 1 em que são carregados os dados brutos da estação total, armazenados no formato .gsi2.



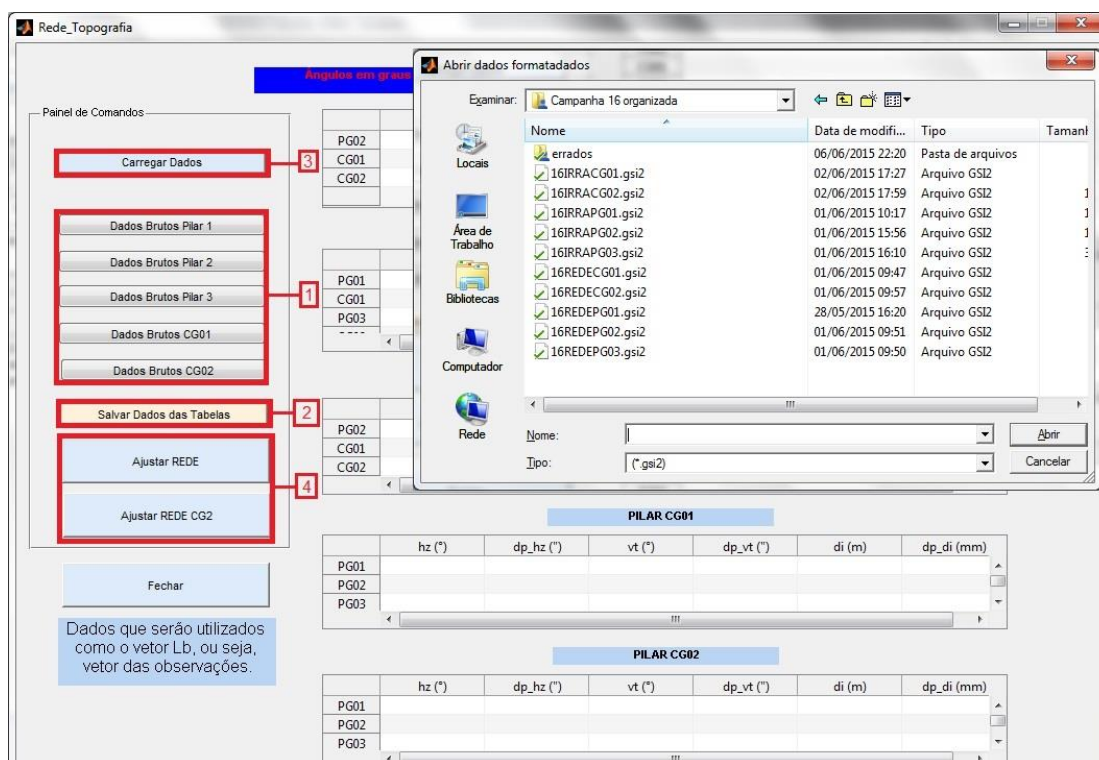


FIGURA 67 – CARREGAR DADOS BRUTOS PARA PROCESSAMENTO DA REDE  
FONTE: O AUTOR

Ao carregar estes dados, o sistema abre automaticamente a janela da FIGURA 68 para carregar um arquivo no formato TXT com os dados relativos às condições atmosféricas. Este arquivo é montado com as informações das condições atmosféricas separadas em colunas. A primeira coluna contém os valores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), a segunda coluna contém os valores de pressão atmosférica (mBar) e a terceira coluna os valores de umidade relativa (%) conforme a FIGURA 69 a seguir.

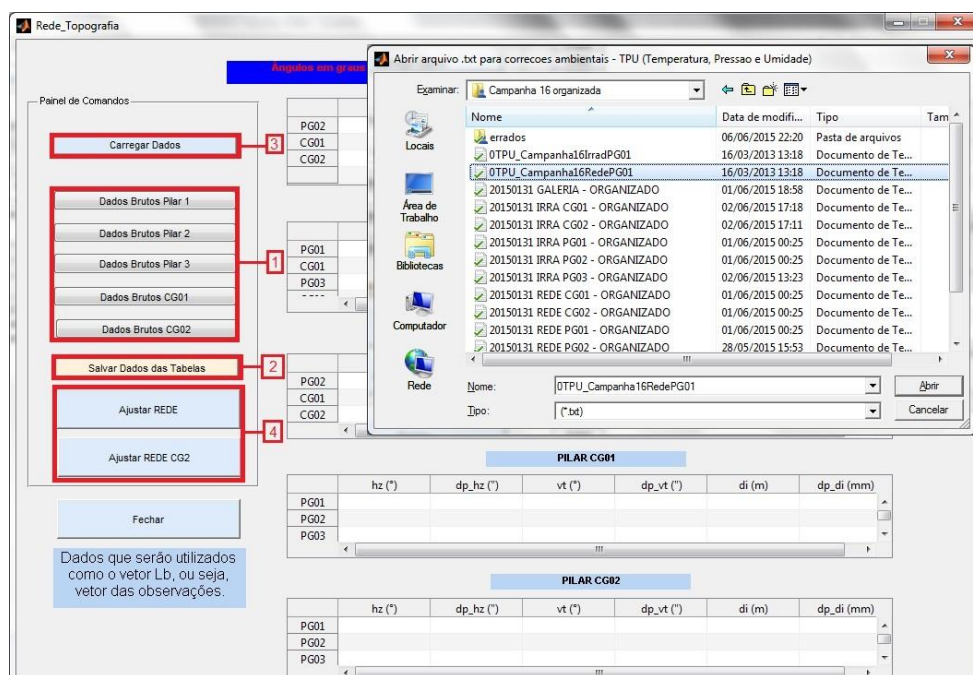


FIGURA 68 – CARREGAR ARQUIVOS COM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS  
FONTE: O AUTOR

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
30.4	942	31		
30.2	942	33		
30.3	942	33		
30.6	942	34		
30.1	942	33		
30.2	942	33		
30.5	942	33		

FIGURA 69 - LEITURAS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 70, já é apresentada a média e o desvio-padrão das leituras da estação total corrigidas das condições atmosféricas e com os *outliers*, se existentes, identificados e eliminados. Cada conjunto de dados, está separado por ponto ocupado. Por exemplo: inicialmente são apresentadas as leituras realizadas com a estação total instalada no ponto PG01 e as visadas nos pontos PG02, CG01 e CG02. Na sequência, a estação total instalada no ponto PG02 e as visadas nos pontos PG01, CG01, PG03 e CG02, e assim sucessivamente.

Rede\_Topografia

**Angulos em graus decimais**

PILAR 1

	hz (°)	dp_hz (")	vt (°)	dp_vt (")	di (m)	dp_di (mm)
PG02	3.2407e-04	0.8124	89.1548	0.5000	757.9187	0.4278
CG01	24.4214	0.6814	90.8919	0.5069	270.5739	0.2357
CG02	8.3983	1.1304	90.4274	0.6614	567.2620	1.1698e-10

PILAR 2

	hz (°)	dp_hz (")	vt (°)	dp_vt (")	di (m)	dp_di (mm)
PG01	3.3951e-04	0.9718	90.8610	0.5590	757.9171	0.31
CG01	347.6844	0.6614	91.6969	0.3536	523.8129	0.21
PG03	323.1104	0.4330	96.3481	0.8819	596.5327	0.41

PILAR 3

	hz (°)	dp_hz (")	vt (°)	dp_vt (")	di (m)	dp_di (mm)
PG02	3.5494e-04	0.9052	83.6680	0.7817	596.5193	0.41
CG01	298.1966	0.6180	78.4669	0.5270	251.9590	0.31
CG02	352.3552	0.6972	82.6280	0.7265	392.5580	1.1698e-10

PILAR CG01

	hz (°)	dp_hz (")	vt (°)	dp_vt (")	di (m)	dp_di (mm)
PG01	0.0113	7.9482	89.1113	0.8292	270.5745	0.51
PG02	143.2560	0.6614	88.3077	0.6614	523.8139	0.21
PG03	236.8976	0.3536	101.5364	0.8457	251.9585	0.51

PILAR CG02

	hz (°)	dp_hz (")	vt (°)	dp_vt (")	di (m)	dp_di (mm)
PG01	211.2418	1.3611	89.5785	1.0938	567.2630	0.21
PG02	5.3819e-04	0.9797	85.6495	0.3720	213.9689	0.21
PG03	158.3098	0.9543	97.3778	1.3611	392.5600	0.21

Panel de Comandos:

Carregar Dados

Dados Brutos Pilar 1

Dados Brutos Pilar 2

Dados Brutos Pilar 3

Dados Brutos CG01

Dados Brutos CG02

Salvar Dados das Tabelas

Ajustar REDE

Ajustar REDE CG2

Fechar

Dados que serão utilizados como o vetor Lb. ou seja, vetor das observações.

FIGURA 70 – LEITURAS APÓS DETECÇÃO DE OUTLIERS  
FONTE: O AUTOR

O ajustamento da rede é realizado a partir da seleção 4 da FIGURA 68 com as coordenadas iniciais aproximadas estando já no Sistema da Barragem. O resultado é observado na FIGURA 71.

Rede\_Topografia

Ajustar\_Rede\_Topografia.CG2

**Precisão do Instrumento:**

precisão angular em segundos: 1

precisão linear em mm: 1 \* 1 ppm

Altura do Instrumento: 0.239

Altura do Sinal: 0.178

**COORDENADAS APROXIMADAS**

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Pilar 1	703.8887	-126.2318	4.3368
Pilar 2	-50.8282	-57.5820	15.6635
Pilar 3	453.6376	253.8800	-50.2607
Ponto CG01	468.6935	7.4834	0.1919
Ponto CG02	152.5290	7.1040	0.4130

**COORDENADAS AJUSTADAS**

	X (m)	dp_x (mm)	Y (m)	dp_y (mm)	Z (m)	dp_z (mm)
Pilar 1	703.8900	1.0392	-126.2276	2.3359	4.2905	1.5641
Pilar 2	-50.8282	0	-57.5820	0	15.6635	0
Pilar 3	453.6423	1.0115	253.8998	1.7928	-50.2282	1.3731
Ponto CG1	468.6995	0.9153	7.4752	1.7108	0.1202	1.4021
Ponto CG2	152.5353	0.8232	7.1112	0.8672	0.1345	0.9387

Salvar Coordenadas

Ajustar rede

Fechar

Cota (Reservatório)

1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8

PG03 158.3098 0.9543 97.3778 1.3611 392.5600 0.21

FIGURA 71 – AJUSTAMENTO DA REDE  
FONTE: O AUTOR

No menu Salvar Coordenadas, as coordenadas ajustadas são salvas, conforme FIGURA 72, para submissão ao teste estatístico.

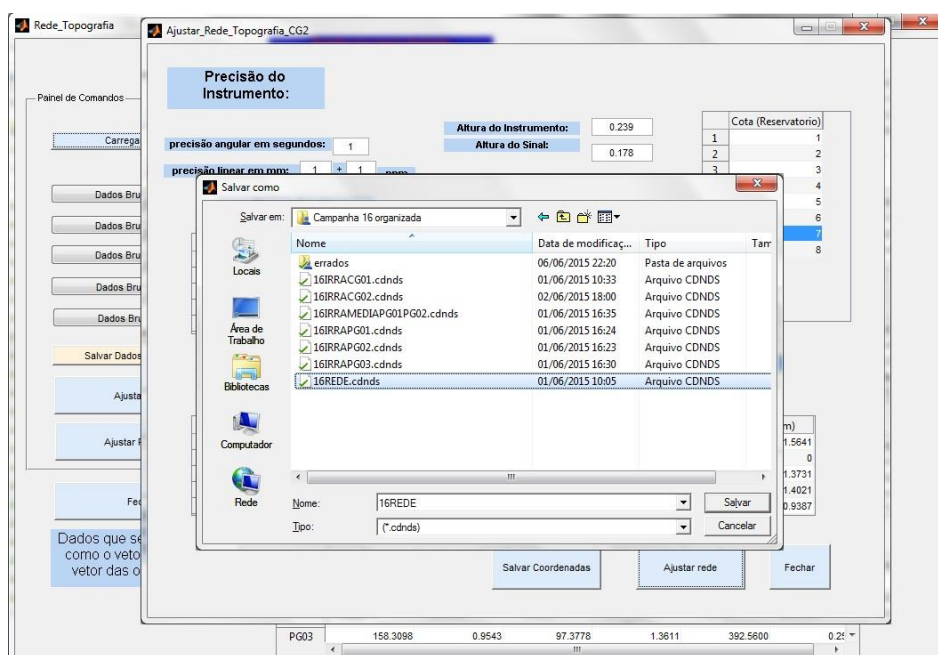


FIGURA 72 – SALVAR COORDENADAS AJUSTADAS  
FONTE: O AUTOR

No menu Geodésia – Dados – Comparar Coordenadas, o sistema compara as coordenadas GNSS nas duas épocas (FIGURA 73).



FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DE COORDENADAS  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 74, carregam-se os arquivos das duas épocas diferentes e o sistema executa o teste estatístico.

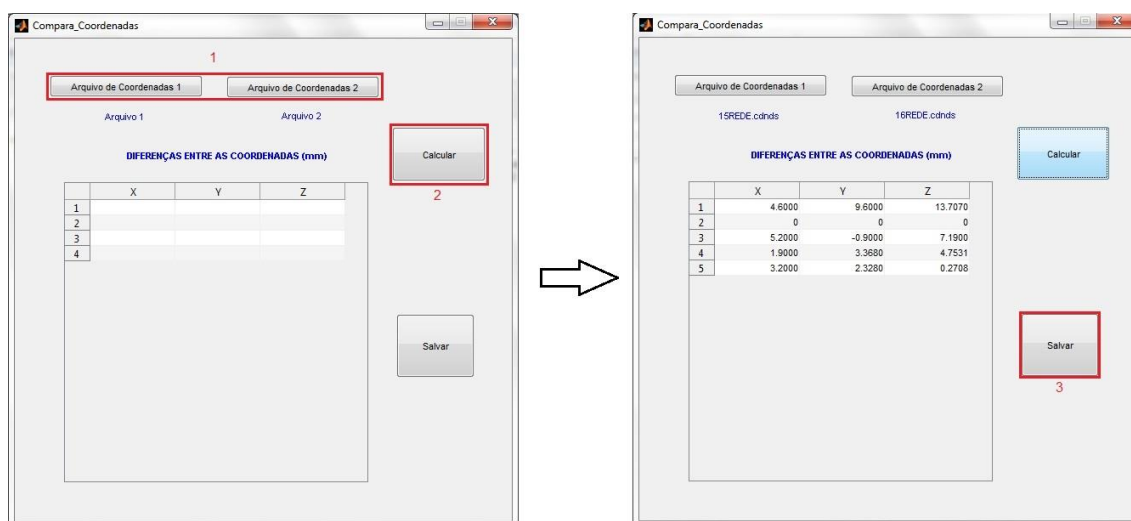


FIGURA 74 – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DE ÉPOCAS DISTINTAS  
FONTE: O AUTOR

O resultado do ajustamento mencionado anteriormente revela se há diferença significativa das coordenadas da rede ao longo do tempo. Dentro de um grau de confiança de 95%, pode-se avaliar se há ou não deslocamento dos pontos da rede geodésica.

Para validação do sistema desenvolvido, utilizam-se as campanhas 15 e 16, realizadas na UHE Mauá, em dezembro de 2014 e março de 2015, respectivamente. No QUADRO 6 e QUADRO 7 estão dispostas as coordenadas dos pontos da rede no Sistema da Barragem, já provenientes da combinação dos GNSS com os métodos de triangulação e trilateração e também com o nivelamento geométrico, a partir das campanhas 15 e 16, com os respectivos desvios-padrão de cada coordenada.  $\sigma$

REDE CAMPANHA 15						
Pontos	X (m)	$\sigma$ (mm)	Y (m)	$\sigma$ (mm)	Z (m)	$\sigma$ (mm)
PG01	703,8859	1,0	-126,2367	2,3	4,2767	1,6
PG02	-50,8282	0,0	-57,5820	0,0	15,6635	0,0
PG03	453,6376	1,0	253,9008	1,8	-50,2355	1,4
CG01	468,6979	0,9	7,4722	1,7	0,1153	1,4
CG02	152,5320	0,8	7,1089	0,9	0,1342	0,9

QUADRO 6 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHA 15  
FONTE: O AUTOR



REDE CAMPANHA 16						
Pontos	X (m)	$\sigma$ (mm)	Y (m)	$\sigma$ (mm)	Z (m)	$\sigma$ (mm)
PG01	703,8905	1,2	-126,2272	2,4	4,2904	1,6
PG02	-50,8282	0,0	-57,5820	0,0	15,6635	0,0
PG03	453,6428	1,0	253,8999	1,9	-50,2282	1,4
CG01	468,7000	1,0	7,4756	1,7	0,1200	1,4
CG02	152,5353	0,9	7,1112	0,9	0,1345	0,9

QUADRO 7 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE – CAMPANHA 16  
FONTE: O AUTOR

Cabe salientar que os valores das coordenadas “Z” são obtidos no ajustamento com a utilização das informações oriundas do nivelamento trigonométrico.

Para fins de ajustamento, o ponto PG02 é considerado injuncionado e, para ele, não há deslocamentos. Isto acontece porque, considerando a configuração da rede, a partir deste marco, todos os demais podem ser observados com a estação total. Por este motivo, foi considerado como ponto com coordenadas fixas, ou seja, como um ponto injuncionado.

No QUADRO 8 observa-se a comparação entre as duas campanhas e se as coordenadas são, estatisticamente, iguais ou diferentes. O ponto mais deslocado é o PG01, com diferenças de 9,5mm e 13,7mm nas coordenadas y e z, respectivamente.

Ponto	Campanha 16 - Campanha 15			TESTE ESTATÍSTICO		
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X	Y	Z
PG01	4,6	9,5	13,7	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
PG02	0,0	0,0	0,0	-	-	-
PG03	5,2	-0,9	7,3	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
CG01	2,1	3,4	4,7	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
CG02	3,3	2,3	0,3	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL

QUADRO 8 – COMPARAÇÃO DAS COORDENADAS DA REDE ENTRE DUAS CAMPANHAS  
FONTE: O AUTOR

A hipótese  $H_0$  é rejeitada para as diferenças de coordenadas cujo resultado apresenta a palavra DIFERENTE. Ou seja, essas coordenadas são diferentes estatisticamente nas duas épocas, dentro do grau de confiança de 95%. Deste modo, são utilizadas as coordenadas da rede obtidas na época 16 para a verificação de deslocamentos dos pontos monitorados. Cabe salientar que esta forma de análise se aplica aos próximos quadros que apresentam teste estatístico.

## 4.2 VERIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DOS PONTOS MONITORADOS

Na FIGURA 75, observa-se a etapa de cálculo da irradiação tridimensional para determinação das coordenadas dos pontos MSUs e MGEs.



FIGURA 75 – CÁLCULO DA IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL  
FONTE: O AUTOR

Carregam-se os dados da estação total. O sistema automaticamente abre uma janela para carregamento dos dados atmosféricos, detecta e elimina *outliers* e calcula as coordenadas, como pode ser observado na sequência da FIGURA 76, FIGURA 77 e FIGURA 78. Em seguida, aplica o teste estatístico para verificação de deslocamento dos pontos monitorados em relação à rede geodésica.

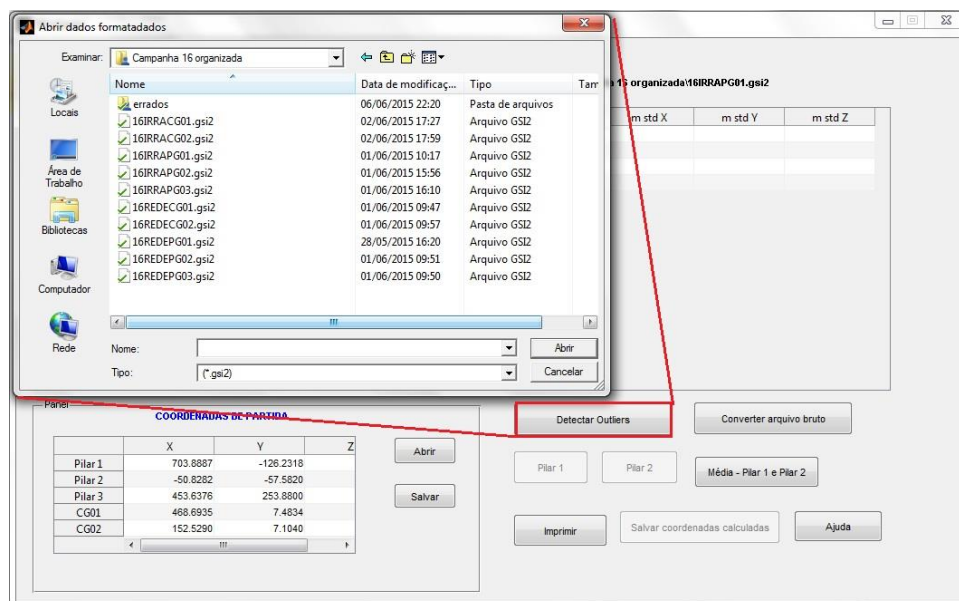


FIGURA 76 – CARREGA DADOS BRUTOS E DETECTA OUTLIERS  
FONTE: O AUTOR

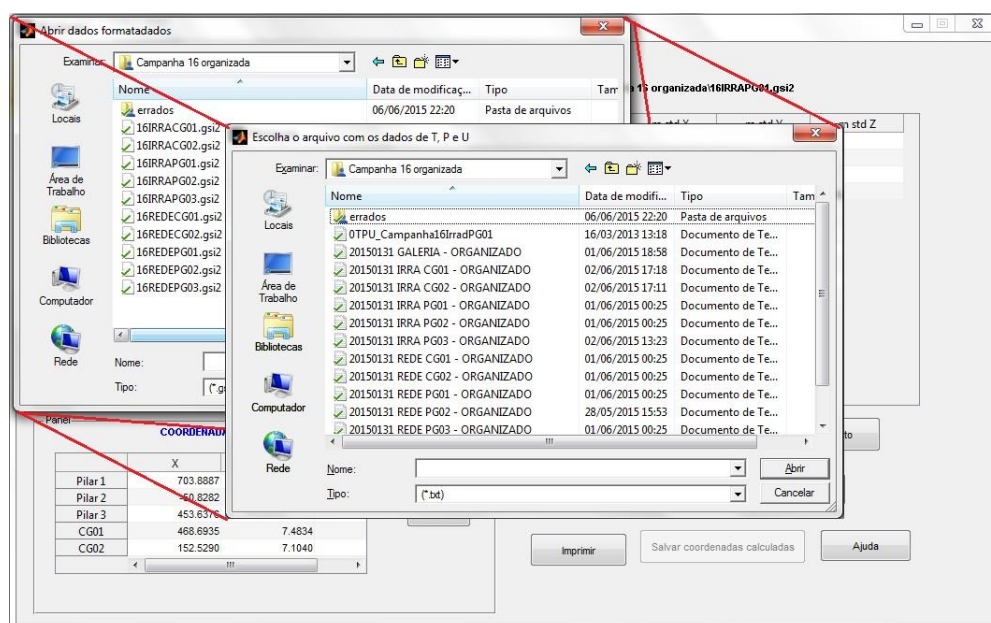


FIGURA 77 – CARREGA DADOS ATMOSFÉRICOS  
FONTE: O AUTOR



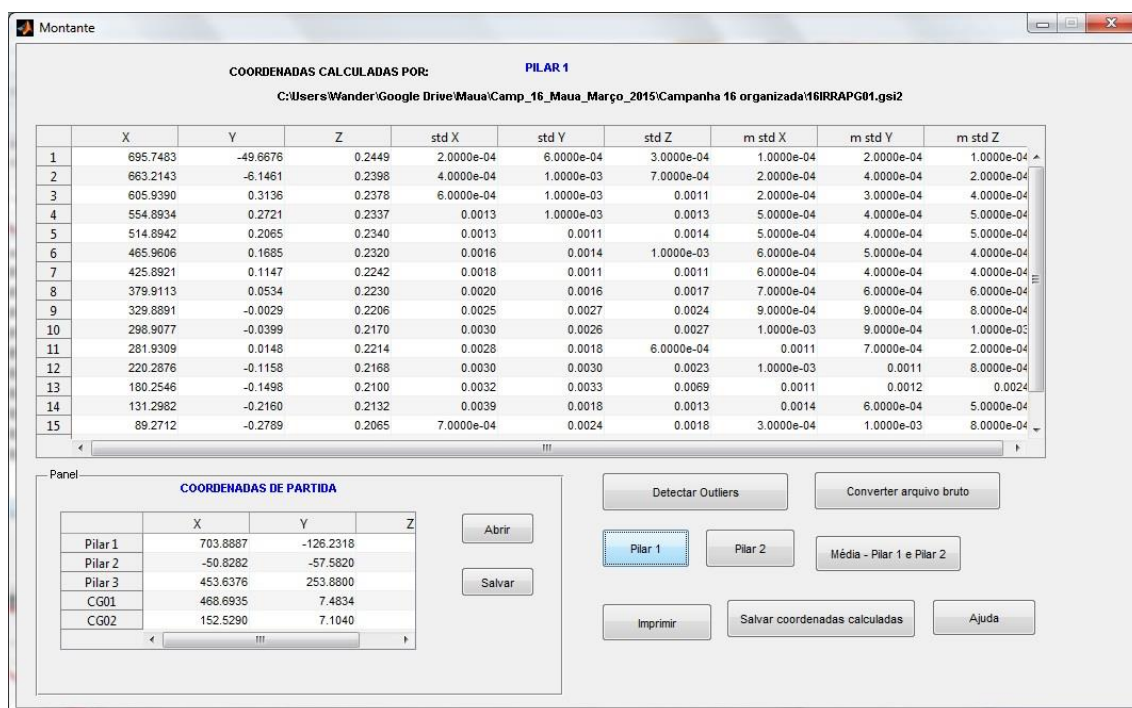


FIGURA 78 – CALCULO DAS COORDENADAS POR IRRADIAÇÃO  
FONTE: O AUTOR

Na FIGURA 78, observa-se o campo Coordenadas de Partida. Verificada a desigualdade estatística das coordenadas da rede em épocas diferentes, neste campo são inseridas as coordenadas da rede da época atual para verificação dos deslocamentos dos pontos da barragem. São inseridas as coordenadas da rede obtidas na época 16 (atual).

#### 4.2.1 Determinação das coordenadas dos pontos à montante (MSUs)

No QUADRO 9 são expostas as coordenadas obtidas a partir da estação PG01, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas XB, YB e ZB.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação:	PG01						Estação:	PG01					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MSU1	695,7463	0,3	-49,6705	0,2	0,2510	0,3	MSU1	695,7486	0,2	-49,6701	0,4	0,2451	0,3
MSU2	663,2145	0,8	-6,1504	0,4	0,2466	0,4	MSU2	663,2156	0,5	-6,1502	0,4	0,2400	0,7
MSU3	605,9399	0,7	0,3057	0,5	0,2447	0,6	MSU3	605,9422	0,5	0,3092	0,5	0,2379	1,0
MSU4	554,8965	0,5	0,2653	0,6	0,2409	0,8	MSU4	554,8984	0,7	0,2678	0,6	0,2339	1,3
MSU5	514,8990	0,4	0,1979	0,7	0,2401	1,1	MSU5	514,9005	0,5	0,2021	0,9	0,2342	1,4
MSU6	465,9663	0,6	0,1594	0,8	0,2394	0,6	MSU6	465,9685	0,6	0,1641	1,1	0,2322	1,0
MSU7	425,9002	0,5	0,1056	1,0	0,2323	1,6	MSU7	425,9014	0,4	0,1102	0,8	0,2243	1,1
MSU8	379,9213	0,4	0,0448	1,0	0,2305	0,5	MSU8	379,9222	0,5	0,0489	1,2	0,2231	1,7
MSU9	329,9005	0,8	-0,0133	1,8	0,2297	1,9	MSU9	329,9017	1,0	-0,0073	2,5	0,2207	2,4
MSU10	298,9201	0,9	-0,0520	2,3	0,2283	1,1	MSU10	298,9213	0,9	-0,0444	2,7	0,2172	2,7
MSU11	281,9441	0,4	0,0025	0,5	0,2322	0,8	MSU11	281,9450	0,4	0,0103	1,5	0,2215	0,6
MSU12	220,3040	0,6	-0,1259	2,4	0,2271	0,9	MSU12	220,3038	0,9	-0,1203	2,6	0,2170	2,3
MSU13	180,2721	0,6	-0,1606	2,2	0,2232	2,2	MSU13	180,2722	0,7	-0,1544	3,1	0,2101	6,9
MSU14	131,3158	0,4	-0,2264	1,4	0,2261	1,9	MSU14	131,3174	0,6	-0,2206	2,0	0,2133	1,3
MSU15	89,2928	0,6	-0,2881	2,6	0,2226	2,3	MSU15	89,2932	0,8	-0,2838	2,4	0,2067	1,8
MSU16	51,3103	0,8	-0,3739	4,0	0,2195	4,7	MSU16	51,3118	0,8	-0,3650	2,4	0,2037	1,8
MSU17	1,2926	0,5	-0,3483	2,0	0,2140	2,4	MSU17	1,2930	1,0	-0,3426	5,6	0,1999	2,2

**QUADRO 9 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO PG01**  
**FONTE: O AUTOR**

No QUADRO 10, a partir do teste estatístico compararam-se as coordenadas dos pontos MSUs obtidas a partir da estação PG01, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

Estação:	PG01			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MSU1	2,3	0,4	-5,9	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU2	1,1	0,2	-6,6	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU3	2,3	3,5	-6,8	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU4	1,9	2,5	-7,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU5	1,5	4,2	-5,9	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU6	2,2	4,7	-7,2	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU7	1,2	4,6	-8,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU8	0,9	4,1	-7,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU9	1,2	6,0	-9,0	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU10	1,2	7,6	-11,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU11	0,9	7,8	-10,7	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU12	-0,2	5,6	-10,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU13	0,1	6,2	-13,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU14	1,6	5,8	-12,8	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU15	0,4	4,3	-15,9	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU16	1,5	8,9	-15,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU17	0,4	5,7	-14,1	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE

**QUADRO 10 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO**  
**FONTE: O AUTOR**

No QUADRO 11 são expostas as coordenadas obtidas a partir da estação PG02, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas x, y e z.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação:	PG02						Estação:	PG02					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MSU1	695,7455	0,2	-49,6636	2,9	0,2514	1,8	MSU1	695,7493	0,3	-49,6562	12,0	0,2249	3,5
MSU2	663,2141	0,2	-6,1422	3,3	0,2528	2,5	MSU2	663,2169	0,4	-6,1489	2,7	0,2252	6,7
MSU3	605,9409	0,3	0,3128	0,9	0,2531	2,7	MSU3	605,9446	0,5	0,3112	3,6	0,2336	3,3
MSU4	554,8981	0,1	0,2718	1,1	0,2526	2,5	MSU4	554,9008	0,6	0,2704	5,8	0,2334	4,0
MSU5	514,8992	0,3	0,2045	1,8	0,2560	0,8	MSU5	514,9022	0,7	0,2041	4,4	0,2394	4,9
MSU6	465,968	0,5	0,1688	1,8	0,2609	1,3	MSU6	465,9702	0,3	0,1707	2,1	0,2445	3,5
MSU7	***	***	***	***	***	***	MSU7	***	***	***	***	***	***
MSU8	379,9212	0,2	0,0527	1,0	0,2587	0,8	MSU8	379,9234	0,4	0,0524	1,4	0,2487	2,6
MSU9	329,9003	0,6	-0,0033	2,1	0,2596	3,1	MSU9	329,9029	0,6	-0,0083	3,3	0,2525	2,4
MSU10	298,9201	0,2	-0,0431	1,3	0,2635	1,0	MSU10	298,9210	0,3	-0,0414	1,3	0,2515	3,6
MSU11	281,9436	0,4	0,0109	0,5	0,2691	1,0	MSU11	281,9458	0,9	0,0127	3,9	0,2579	2,8
MSU12	220,3032	0,3	-0,1177	1,3	0,2697	1,4	MSU12	220,3042	0,3	-0,1140	1,7	0,2612	1,6
MSU13	180,2718	0,3	-0,1530	0,7	0,2699	0,8	MSU13	180,2736	0,5	-0,1512	1,4	0,2610	2,0
MSU14	131,3159	0,2	-0,2181	0,5	0,2787	0,7	MSU14	131,3174	0,7	-0,2184	1,8	0,2705	2,1
MSU15	89,2929	0,1	-0,2799	0,3	0,2782	0,7	MSU15	89,2927	0,5	-0,2799	1,6	0,2703	0,5
MSU16	51,3102	0,2	-0,3644	0,4	0,2811	0,6	MSU16	51,3116	0,9	-0,3658	1,2	0,2742	1,5
MSU17	***	***	***	***	***	***	MSU17	***	***	***	***	***	***

QUADRO 11 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO PG02  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 12, a partir do teste estatístico comparam-se as coordenadas dos MSUs obtidas a partir da estação PG02, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

Estação:	PG02			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MSU1	3,8	7,4	-26,5	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU2	2,8	-6,7	-27,6	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU3	3,7	-1,6	-19,5	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU4	2,7	-1,4	-19,2	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU5	3,0	-0,4	-16,6	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU6	2,2	1,9	-16,4	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU7	***	***	***	-	-	-
MSU8	2,2	-0,3	-10,0	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU9	2,6	-5,0	-7,1	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU10	0,9	1,7	-12,0	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU11	2,2	1,8	-11,2	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU12	1,0	3,7	-8,5	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU13	1,8	1,8	-8,9	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU14	1,5	-0,3	-8,2	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU15	-0,2	0,0	-7,9	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU16	1,4	-1,4	-6,9	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU17	***	***	***	-	-	-

QUADRO 12 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 13 são expostas as médias das coordenadas dos MSUs obtidas a partir das estações PG01 e PG02, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas x, y e z. Esta média é realizada por causa da diferença entre as coordenadas obtidas a partir destes dois pilares. A visada é longa e ocorre sobre o lago, sofrendo interferência da refração atmosférica.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação	MÉDIA PG1 E PG02						Estação	MÉDIA PG1 E PG02					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MSU1	695,7459	0,3	-49,6671	2,1	0,2512	1,3	MSU1	695,7489	0,3	-49,6632	8,5	0,2350	2,5
MSU2	663,2143	0,6	-6,1463	2,4	0,2497	1,8	MSU2	663,2163	0,5	-6,1496	1,9	0,2326	4,8
MSU3	605,9404	0,5	0,3093	0,7	0,2489	2,0	MSU3	605,9434	0,5	0,3102	2,6	0,2358	2,4
MSU4	554,8973	0,4	0,2685	0,9	0,2468	1,9	MSU4	554,8996	0,7	0,2691	4,1	0,2337	3,0
MSU5	514,8991	0,4	0,2012	1,4	0,2481	1,0	MSU5	514,9014	0,6	0,2031	3,2	0,2368	3,6
MSU6	465,9672	0,6	0,1641	1,4	0,2502	1,0	MSU6	465,9693	0,5	0,1674	1,7	0,2384	2,6
MSU7	425,9002	0,5	0,1056	1,0	0,2323	1,6	MSU7	425,9014	0,4	0,1102	0,8	0,2243	1,1
MSU8	379,9213	0,3	0,0488	1,0	0,2446	0,7	MSU8	379,9228	0,5	0,0507	1,3	0,2359	2,2
MSU9	329,9004	0,7	-0,0083	2,0	0,2446	2,6	MSU9	329,9023	0,8	-0,0078	2,9	0,2366	2,4
MSU10	298,9201	0,7	-0,0475	1,9	0,2459	1,1	MSU10	298,9212	0,7	-0,0429	2,1	0,2344	3,2
MSU11	281,9439	0,4	0,0067	0,5	0,2507	0,9	MSU11	281,9454	0,7	0,0115	3,0	0,2397	2,0
MSU12	220,3036	0,5	-0,1218	1,9	0,2484	1,2	MSU12	220,3040	0,7	-0,1172	2,2	0,2391	2,0
MSU13	180,2720	0,5	-0,1568	1,6	0,2466	1,7	MSU13	180,2729	0,6	-0,1528	2,4	0,2356	5,1
MSU14	131,3159	0,3	-0,2223	1,1	0,2524	1,4	MSU14	131,3174	0,7	-0,2195	1,9	0,2419	1,7
MSU15	89,2929	0,4	-0,2840	1,9	0,2504	1,7	MSU15	89,2929	0,7	-0,2819	2,0	0,2385	1,3
MSU16	51,3102	0,6	-0,3692	2,8	0,2503	3,4	MSU16	51,3117	0,9	-0,3654	1,9	0,2390	1,7
MSU17	1,2926	0,5	-0,3483	2,0	0,2140	2,4	MSU17	1,2930	1,0	-0,3426	5,6	0,1999	2,2

QUADRO 13 – MÉDIA DAS COORDENADAS DOS MSUs OBTIDAS POR PG01 E PG02

FONTE: O AUTOR

No QUADRO 14, a partir do teste estatístico comparam-se as médias das coordenadas dos MSUs, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

CAMPANHA 16 - CAMPANHA 15						
Estação	MÉDIA PG1 E PG02			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MSU1	3,0	3,9	-16,2	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU2	2,0	-3,3	-17,1	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU3	3,0	0,9	-13,1	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU4	2,3	0,6	-13,1	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU5	2,3	1,9	-11,3	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU6	2,1	3,3	-11,8	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU7	1,2	4,6	-8,0	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU8	1,5	1,9	-8,7	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU9	1,9	0,5	-8,0	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU10	1,1	4,6	-11,5	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU11	1,5	4,8	-11,0	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU12	0,4	4,6	-9,3	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU13	0,9	4,0	-11,0	IGUAL	IGUAL	IGUAL
MSU14	1,5	2,8	-10,5	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU15	0,0	2,1	-11,9	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU16	1,5	3,8	-11,3	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU17	0,4	5,7	-14,1	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE

#### QUADRO 14 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO

FONTE: O AUTOR

No QUADRO 15 são expostas as coordenadas obtidas pela estação CG01, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas x, y e z.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação:	CG01						Estação:	CG01					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MSU1	695,7443	0,4	-49,6549	1,5	0,3609	1,4	MSU1	695,7438	0,3	-49,6618	0,8	0,3588	1,1
MSU2	663,2116	0,1	-6,1319	1,3	0,3550	2,6	MSU2	663,2119	0,3	-6,1395	1,9	0,3537	1,8
MSU3	605,9385	0,2	0,3202	1,5	0,3583	0,6	MSU3	605,9388	0,4	0,3180	0,7	0,3580	0,4
MSU4	554,8958	0,2	0,2779	0,5	0,3563	0,6	MSU4	554,8957	0,0	0,2758	0,2	0,3564	0,2
MSU5	514,8973	0,2	0,2094	0,2	0,3582	0,2	MSU5	514,8971	0,0	0,2075	0,1	0,3583	0,1
MSU6	465,9649	0,0	0,1698	0,0	0,3593	0,0	MSU6	465,9642	0,1	0,1692	0,2	0,3594	0,0
MSU7	425,8970	0,2	0,1157	0,1	0,3526	0,1	MSU7	425,8970	0,0	0,1162	0,2	0,3523	0,0

#### QUADRO 15 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO CG01

FONTE: O AUTOR

No QUADRO 16, a partir do teste estatístico compararam-se as coordenadas dos MSUs obtidas a partir do CG01, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

Estação:	CG01			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MSU1	-0,5	-6,9	-2,1	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU2	0,3	-7,6	-1,3	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU3	0,3	-2,2	-0,3	IGUAL	IGUAL	IGUAL
MSU4	-0,1	-2,1	0,1	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU5	-0,2	-1,9	0,1	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU6	-0,7	-0,6	0,1	DIFERENTE	DIFERENTE	-
MSU7	0,0	0,5	-0,3	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE

QUADRO 16 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 17 são expostas as coordenadas dos MSUs obtidas a partir da estação CG02, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas x, y e z.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação:	CG02						Estação:	CG02					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MSU7	425,8945	0,2	0,1125	2,4	0,5599	2,2	MSU7	465,9611	0,2	0,1565	2,4	0,5649	2,6
MSU8	379,9147	0,2	0,0487	3,2	0,5635	1,8	MSU8	379,9144	0,2	0,0425	2,3	0,5660	1,6
MSU9	329,8942	0,2	-0,0105	1,1	0,5693	0,8	MSU9	329,8935	0,4	-0,0148	0,8	0,5688	0,7
MSU10	298,9136	0,2	-0,0482	1,1	0,5697	0,5	MSU10	298,9125	0,3	-0,0519	0,6	0,5700	0,7
MSU11	281,9371	0,4	0,0063	0,7	0,574	0,9	MSU11	281,9375	0,2	0,0042	0,6	0,5748	0,4
MSU12	220,2966	0,2	-0,1233	0,3	0,5742	0,4	MSU12	220,2967	0,0	-0,1233	0,2	0,5764	0,1
MSU13	180,265	0,0	-0,1583	0,1	0,5738	0,1	MSU13	180,2661	0,0	-0,1580	0,1	0,5752	0,0
MSU14	131,3077	0,0	-0,2244	0,0	0,5809	0	MSU14	131,3086	0,3	-0,2245	0,1	0,5815	0,1
MSU15	89,2852	0,0	-0,2853	0,3	0,5788	0,2	MSU15	89,2853	0,2	-0,2866	0,2	0,5794	0,2
MSU16	51,3024	0,2	-0,3696	0,5	0,5799	0,3	MSU16	51,3025	0,2	-0,3700	0,2	0,5801	0,3
MSU17	1,2844	0,4	-0,3432	0,9	0,5768	0,3	MSU17	1,2850	0,4	-0,3444	0,5	0,5769	0,7

QUADRO 17 - COORDENADAS DOS PONTOS DE MONTANTE A PARTIR DO CG02  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 18, a partir do teste estatístico comparam-se as coordenadas dos MSUs obtidas a partir de CG02, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

Estação:	CG02			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MSU7	40066,6	44,0	5,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU8	-0,3	-6,2	2,5	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU9	-0,7	-4,3	-0,5	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL
MSU10	-1,1	-3,7	0,3	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL
MSU11	0,4	-2,1	0,8	IGUAL	DIFERENTE	IGUAL
MSU12	0,1	0,0	2,2	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MSU13	1,1	0,3	1,4	-	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU14	0,9	-0,1	0,6	DIFERENTE	IGUAL	DIFERENTE
MSU15	0,1	-1,3	0,6	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MSU16	0,1	-0,4	0,2	IGUAL	IGUAL	IGUAL
MSU17	0,6	-1,2	0,1	IGUAL	IGUAL	IGUAL

QUADRO 18 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO  
FONTE: O AUTOR

É possível verificar a existência de um valor muito diferente para a coordenada X do ponto MSU7 obtida na campanha 16. Este erro grosseiro possivelmente ocorreu porque a estação total pode ter buscado o prisma posicionado no MSU6 e não no MSU7.

#### 4.2.2 Determinação das coordenadas dos pontos à jusante (MGEs)

No QUADRO 19 são apresentadas as coordenadas dos pontos de jusante (MGEs), obtidas da estação PG03, nas campanhas 15 e 16, respectivamente, com os desvios-padrão das coordenadas x, y e z.

No QUADRO 20, a partir do teste estatístico comparam-se as coordenadas dos MGEs obtidas a partir do PG03, nas campanhas 15 e 16. O lado direito do quadro demonstra se as coordenadas nas duas campanhas são, estatisticamente, iguais ou diferentes, dentro de um grau de confiança de 95%.

CAMPANHA 15							CAMPANHA 16						
Estação:	PG03						Estação:	PG03					
	X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)		X (m)	dp(mm)	Y (m)	dp(mm)	Z (m)	dp(mm)
MGE01	128,4337	1,2	7,2282	2,0	-10,1680	2,2	MGE01	128,4327	1,0	7,2302	1,2	-10,1765	0,6
MGE02	201,6002	1,0	7,3347	1,4	-10,1284	0,6	MGE02	201,5979	0,5	7,3388	0,4	-10,1365	1,5
MGE03	250,5407	0,7	7,3964	0,9	-10,1245	0,8	MGE03	250,5388	1,0	7,4003	0,9	-10,1322	1,2
MGE04	146,7855	0,9	9,1387	1,7	-12,8835	1,0	MGE04	146,7839	0,7	9,1419	0,3	-12,8939	1,7
MGE05	146,7911	1,3	9,0913	2,1	-13,8913	1,5	MGE05	146,7892	0,8	9,0949	0,7	-13,9007	1,5
MGE06	182,2982	1,2	15,6392	1,8	-22,1368	1,2	MGE06	182,2970	0,8	15,6424	1,3	-22,1454	1,3
MGE07	223,1572	1,2	15,6677	1,5	-22,1531	1,8	MGE07	223,1542	0,9	15,6728	0,9	-22,1600	0,8
MGE08	342,4740	1,4	7,4454	0,9	-10,2374	1,3	MGE08	342,4722	1,3	7,4486	0,5	-10,2448	0,4
MGE09	371,7610	0,8	7,4284	0,6	-10,2190	1,2	MGE09	371,7590	0,9	7,4312	0,3	-10,2262	0,4
MGE10	393,5755	1,0	7,4698	0,6	-10,1995	1,1	MGE10	393,5726	0,3	7,4722	0,2	-10,2055	0,7
MGE11	416,1315	1,0	7,5003	0,5	-10,3433	1,4	MGE11	416,1289	0,6	7,5026	0,6	-10,3497	1,5
MGE12	444,8575	1,6	7,5914	0,4	-10,1632	1,0	MGE12	444,8549	0,9	7,5929	0,3	-10,1702	0,9
MGE13	495,3333	1,5	7,6751	0,4	-10,0620	1,2	MGE13	495,3305	0,8	7,6764	0,1	-10,0668	0,3
MGE14	458,7227	1,1	10,3474	0,3	-14,8522	1,4	MGE14	458,7213	1,2	10,3485	0,4	-14,8590	1,3
MGE15	468,2113	1,0	14,0740	0,3	-20,0187	1,6	MGE15	468,2093	0,6	14,0749	0,4	-20,0249	1,9
MGE16	436,8275	1,1	14,0113	0,2	-19,9483	0,6	MGE16	436,8258	0,9	14,0128	0,3	-19,9547	1,3
MGE17	404,6309	1,7	13,9566	0,8	-19,8961	1,8	MGE17	404,6295	0,6	13,9584	0,1	-19,9032	0,7
MGE18	229,6999	0,7	7,3903	0,4	-10,4779	0,9	MGE18	229,6985	1,3	7,3947	1,4	-10,4851	1,4
MGE19	229,6605	0,7	8,2444	1,2	-12,8717	1,0	MGE19	229,6594	0,8	8,2478	0,7	-12,8793	0,8
MGE20	229,5399	1,0	10,1247	1,3	-15,2634	2,0	MGE20	229,5382	1,1	10,1286	0,5	-15,2711	0,8
MGE21	229,6015	1,0	12,0280	1,4	-17,6867	1,7	MGE21	229,6005	1,1	12,0313	0,6	-17,6943	1,3
MGE22	229,7053	1,7	13,8347	2,0	-20,1118	1,8	MGE22	229,7039	1,0	13,8385	0,8	-20,1189	1,0
MGE23	229,6502	1,0	15,6913	1,0	-22,3838	1,9	MGE23	229,6486	1,7	15,6946	1,4	-22,3911	1,0
MGE24	229,5422	0,6	17,5894	0,8	-24,9661	1,2	MGE24	229,5408	0,4	17,5928	0,3	-24,9734	0,9
MGE25	229,4686	0,9	19,4304	1,0	-27,3086	1,1	MGE25	229,4680	1,3	19,4325	0,9	-27,3176	1,4
MGE26	229,5425	0,9	21,3074	0,8	-29,7108	1,5	MGE26	229,5409	0,8	21,3102	0,7	-29,7190	1,0
MGE27	229,6275	1,1	23,1478	1,2	-32,0346	1,6	MGE27	na visada do ponto MGE27)					
MGE28	229,5491	0,9	25,0449	1,2	-34,4242	1,8	MGE28	229,5479	1,1	25,0476	1,0	-34,4316	1,3
MGE29	229,5446	1,3	26,8824	1,7	-36,8904	1,5	MGE29	229,5445	0,4	26,8850	0,2	-36,8986	0,9
MGE30	229,5952	1,7	28,7290	1,6	-39,2304	1,2	MGE30	229,5936	1,2	28,7327	0,8	-39,2388	0,7
MGE31	229,6034	1,1	30,6254	1,4	-41,6359	1,6	MGE31	229,6022	0,8	30,6282	0,4	-41,6437	0,4
MGE32	229,6488	0,7	32,4429	0,7	-44,0104	1,6	MGE32	229,6468	1,3	32,4460	1,0	-44,0175	1,1
MGE33	229,6856	1,2	34,3075	1,5	-46,4574	1,6	MGE33	229,6841	1,0	34,3107	0,8	-46,4652	1,1
MGE34	229,6193	1,0	36,1796	1,1	-48,7805	1,3	MGE34	229,6182	0,7	36,1824	0,7	-48,7883	1,3
MGE35	229,5635	0,8	38,0565	0,8	-51,1148	1,7	MGE35	229,5621	0,3	38,0594	0,3	-51,1213	0,7
MGE36	378,2642	1,3	8,3351	0,6	-12,7868	1,6	MGE36	378,2621	0,8	8,3378	0,2	-12,7923	0,9
MGE37	378,2780	0,9	10,2144	0,5	-15,1661	1,1	MGE37	378,2760	0,1	10,2169	0,2	-15,1725	0,7
MGE38	378,1766	0,9	12,0923	0,6	-17,5145	1,3	MGE38	378,1743	0,9	12,0948	0,3	-17,5207	0,3
MGE39	378,0865	0,8	13,9316	0,8	-19,9897	1,8	MGE39	378,0846	0,5	13,9340	0,3	-19,9969	0,9
MGE40	378,1675	0,7	15,8065	0,6	-22,2326	1,6	MGE40	378,1657	1,4	15,8088	0,5	-22,2405	0,3
MGE41	378,0763	1,3	17,6828	0,9	-24,7817	1,3	MGE41	378,0740	0,8	17,6854	0,3	-24,7880	0,6
MGE42	378,1586	0,3	19,5250	0,6	-27,0019	1,5	MGE42	378,1563	0,5	19,5272	0,3	-27,0090	0,3
MGE43	378,2143	1,0	21,3736	0,7	-29,5702	1,1	MGE43	378,2128	0,7	21,3753	0,2	-29,5770	0,5
MGE44	378,1854	0,8	23,2381	0,3	-31,9234	1,1	MGE44	378,1840	0,6	23,2400	0,2	-31,9295	0,3
MGE45	378,0270	0,6	25,1131	0,4	-34,3514	1,2	MGE45	378,0258	0,8	25,1148	0,3	-34,3577	1,0
MGE46	378,1450	0,9	26,9594	0,4	-36,8444	1,6	MGE46	378,1435	1,3	26,9614	0,2	-36,8506	1,0
MGE47	378,1548	1,1	28,8064	0,5	-39,0729	1,0	MGE47	378,1532	0,5	28,8082	0,3	-39,0792	1,3
MGE48	378,1067	0,8	30,6987	0,6	-41,6209	1,2	MGE48	378,1060	0,5	30,7003	0,3	-41,6277	0,8
MGE49	378,1870	1,1	32,5464	0,4	-43,9647	0,6	MGE49	378,1868	0,4	32,5473	0,1	-43,9711	0,7
MGE50	405,1425	0,9	8,3939	0,6	-12,8386	1,3	MGE50	405,1392	0,6	8,3964	0,0	-12,8454	0,6
MGE51	405,1282	0,7	10,2480	0,2	-15,1804	0,6	MGE51	405,1245	0,4	10,2504	0,6	-15,1871	1,4
MGE52	405,0965	1,0	12,1304	0,5	-17,5888	1,4	MGE52	405,0938	0,9	12,1323	0,2	-17,5958	0,8
MGE53	405,2553	0,3	15,8364	0,2	-22,2526	1,3	MGE53	405,2534	0,3	15,8381	0,4	-22,2599	1,1
MGE54	405,0979	0,9	17,6957	0,5	-24,8121	0,6	MGE54	405,0969	1,1	17,6971	0,4	-24,8192	0,6
MGE55	405,1906	1,0	19,5213	0,5	-27,0829	1,3	MGE55	405,1876	0,6	19,5232	0,3	-27,0890	0,8
MGE56	405,2677	0,9	21,4196	0,4	-29,6675	1,2	MGE56	405,2658	0,6	21,4209	0,2	-29,6745	1,3
MGE57	405,2512	0,9	23,2546	0,4	-32,0460	0,9	MGE57	405,2497	1,1	23,2558	0,2	-32,0528	0,9
MGE58	405,1087	1,7	25,1101	0,7	-34,4164	0,7	MGE58	405,1065	1,4	25,1119	0,4	-34,4227	0,7
MGE59	405,1506	1,0	26,9923	0,4	-36,8105	1,3	MGE59	405,1481	0,4	26,9938	0,1	-36,8163	0,3
MGE60	405,1785	0,7	28,8212	0,5	-39,2249	1,7	MGE60	405,1772	0,6	28,8223	0,5	-39,2317	0,7
MGE61	405,1595	1,0	30,6931	0,3	-41,5229	1,8	MGE61	405,1588	0,7	30,6942	0,4	-41,5286	0,7
MGE62	405,0678	0,9	32,5729	0,3	-43,9277	1,2	MGE62	405,0670	1,6	32,5743	0,4	-43,9331	0,5
PGG01	474,6752	1,3	14,7700	0,1	-19,8552	0,6	PGG01	474,6725	0,5	14,7704	0,2	-19,8601	0,8

QUADRO 19 - COORDENADAS DOS PONTOS DE JUSANTE A PARTIR DO  
PG03  
FONTE: O AUTOR



Estação:	PG03			TESTE ESTATÍSTICO		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X	Y	Z
MGE01	-1,0	2,0	-8,5	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
MGE02	-2,3	4,1	-8,1	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE03	-1,9	3,9	-7,7	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE04	-1,6	3,2	-10,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE05	-1,9	3,6	-9,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE06	-1,2	3,2	-8,6	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE07	-3,0	5,1	-6,9	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE08	-1,8	3,2	-7,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE09	-2,0	2,8	-7,2	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE10	-2,9	2,4	-6,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE11	-2,6	2,3	-6,4	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE12	-2,6	1,5	-7,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE13	-2,8	1,3	-4,8	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE14	-1,4	1,1	-6,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE15	-2,0	0,9	-6,2	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE16	-1,7	1,5	-6,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE17	-1,4	1,8	-7,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE18	-1,4	4,4	-7,2	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE19	-1,1	3,4	-7,6	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE20	-1,7	3,9	-7,7	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE21	-1,0	3,3	-7,6	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE22	-1,4	3,8	-7,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE23	-1,6	3,3	-7,3	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE24	-1,4	3,4	-7,3	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE25	-0,6	2,1	-9,0	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE26	-1,6	2,8	-8,2	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE27	-	-23.147,8	32.034,6	-	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE28	-1,2	2,7	-7,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE29	-0,1	2,6	-8,2	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE30	-1,6	3,7	-8,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE31	-1,2	2,8	-7,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE32	-2,0	3,1	-7,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE33	-1,5	3,2	-7,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE34	-1,1	2,8	-7,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE35	-1,4	2,9	-6,5	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE36	-2,1	2,7	-5,5	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE37	-2,0	2,5	-6,4	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE38	-2,3	2,5	-6,2	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE39	-1,9	2,4	-7,2	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE40	-1,8	2,3	-7,9	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE41	-2,3	2,6	-6,3	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE42	-2,3	2,2	-7,1	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE43	-1,5	1,7	-6,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE44	-1,4	1,9	-6,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE45	-1,2	1,7	-6,3	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE46	-1,5	2,0	-6,2	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE47	-1,6	1,8	-6,3	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE48	-0,7	1,6	-6,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE49	-0,2	0,9	-6,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE50	-3,3	2,5	-6,8	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE51	-3,7	2,4	-6,7	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE52	-2,7	1,9	-7,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE53	-1,9	1,7	-7,3	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE54	-1,0	1,4	-7,1	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE55	-3,0	1,9	-6,1	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE56	-1,9	1,3	-7,0	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE57	-1,5	1,2	-6,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE58	-2,2	1,8	-6,3	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE59	-2,5	1,5	-5,8	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE60	-1,3	1,1	-6,8	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE61	-0,7	1,1	-5,7	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
MGE62	-0,8	1,4	-5,4	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE
PGG01	-2,7	0,4	-4,9	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE

QUADRO 20 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO  
 FONTE: O AUTOR

Analisando os quadros que contêm as coordenadas dos pontos MSUs e MGEs constata-se que, após os testes estatísticos para um nível de significância de 95%, as coordenadas são estatisticamente diferentes.

Considerando as variações térmicas decorrentes das estações do ano e a variação do volume de água do reservatório, estas movimentações não significam, necessariamente, que existe deslocamento ou deformação da estrutura da barragem. Cabe ao profissional da Engenharia Civil avaliar o grau da movimentação dentro do critério de segurança em relação à ruptura. (CRANENBROECK, 2011).

#### 4.2.3 Determinação das coordenadas dos pontos da poligonal (EGIs)

Na FIGURA 79 observa-se o menu Geodésia – Poligonal Topográfica para cálculo dos pontos da galeria de inspeção.



FIGURA 79 – MENU POLIGONAL TOPOGRÁFICA  
FONTE: O AUTOR

O sistema carrega os dados da estação total, corrige as observações das condições atmosféricas, detecta *outliers* e calcula os pontos denominados EGIs (FIGURA 80).

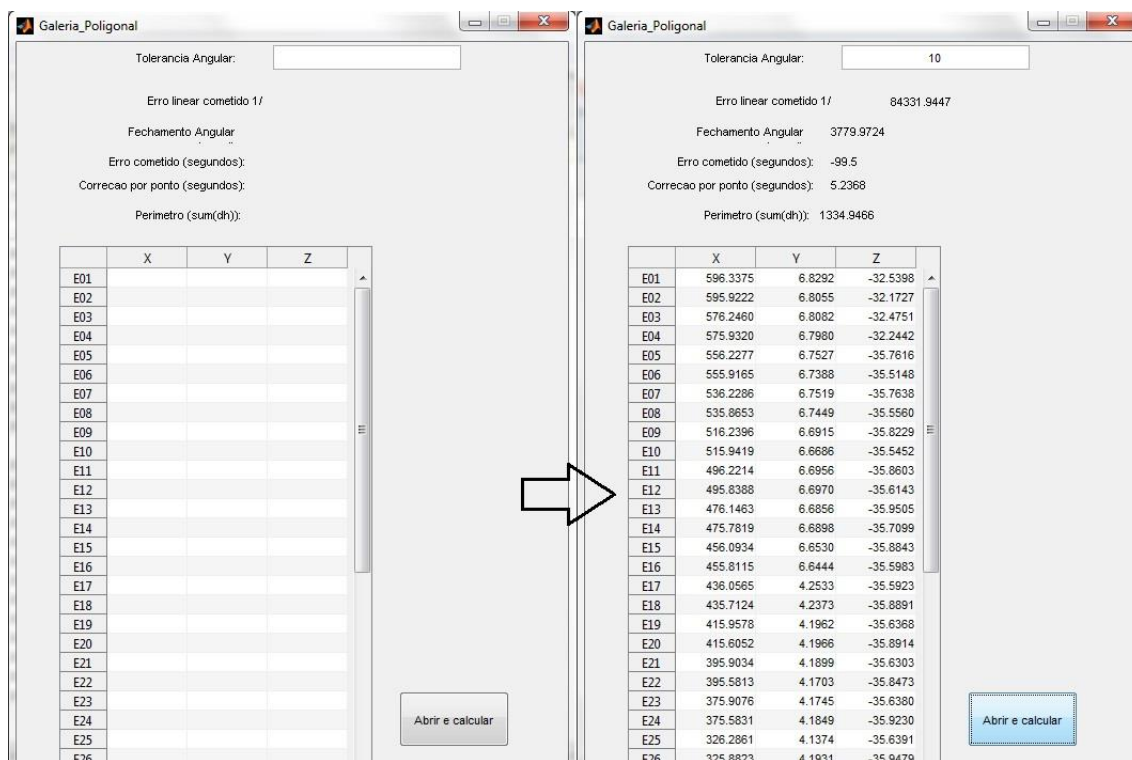


FIGURA 80 – CÁLCULO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA DE INSPEÇÃO  
FONTE: O AUTOR

No QUADRO 21 são expostas as coordenadas das EGIs, obtidas na campanha 16, cujo erro de fechamento é de 1:84331. As demais campanhas tiveram problemas em razão de obras realizadas no interior da galeria e, por isso, seus resultados não são apresentados.

CAMPANHA 16			
Erro Linear	1: 84331,94		
Erro Angular por ponto:	5,2368		
Ponto de Monitoramento	X (m)	Y (m)	Z (m)
E01	596,3375	6,8292	-32,5398
E02	595,9222	6,8055	-32,1727
E03	576,2460	6,8082	-32,4751
E04	575,9320	6,7980	-32,2442
E05	556,2277	6,7527	-35,7616
E06	555,9165	6,7388	-35,5148
E07	536,2286	6,7519	-35,7638
E08	535,8653	6,7449	-35,5560
E09	516,2396	6,6915	-35,8229
E10	515,9419	6,6686	-35,5452
E11	496,2214	6,6956	-35,8603
E12	495,8388	6,6970	-35,6143
E13	476,1463	6,6856	-35,9505
E14	475,7819	6,6898	-35,7099
E15	456,0934	6,6530	-35,8843
E16	455,8115	6,6444	-35,5983
E17	436,0565	4,2533	-35,5923
E18	435,7124	4,2373	-35,8891
E19	415,9578	4,1962	-35,6368
E20	415,6052	4,1966	-35,8914
E21	395,9034	4,1899	-35,6303
E22	395,5813	4,1703	-35,8473
E23	375,9076	4,1745	-35,6380
E24	375,5831	4,1849	-35,9230
E25	326,2861	4,1374	-35,6391
E26	325,8823	4,1931	-35,9479
E27	310,8893	4,0963	-35,5948
E28	310,5873	4,1059	-35,8895
E30	295,1905	4,1209	-35,8815
E31	280,0989	4,0580	-35,6796
E32	270,5056	4,1108	-35,6886
E33	270,0758	4,0776	-35,9283
E34	250,4525	4,0833	-35,7074
E35	250,1678	4,0511	-35,9552
E36	230,4217	4,0640	-35,9580
E37	230,0208	4,1000	-35,6130
E38	210,3015	4,0828	-35,6393
E39	210,0070	4,0664	-35,9404
E40	190,2317	3,9970	-35,6618
E41	189,9744	4,0252	-35,9867
E42	170,3333	3,9863	-35,7203
E44	130,8129	6,3178	-25,7617
E45	130,4162	6,2816	-25,4935

QUADRO 21 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DA GALERIA DE INSPEÇÃO  
FONTE: O AUTOR

#### 4.2.4 Representação gráfica dos deslocamentos

Na FIGURA 81, observam-se as elipses de erro de alguns pontos de monitoramento MSUs, representadas sobre a imagem de um detalhe da UHE. Estas elipses indicam os valores máximo e mínimo dos desvios-padrão ( $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ) calculados para as coordenadas de cada ponto de monitoramento.

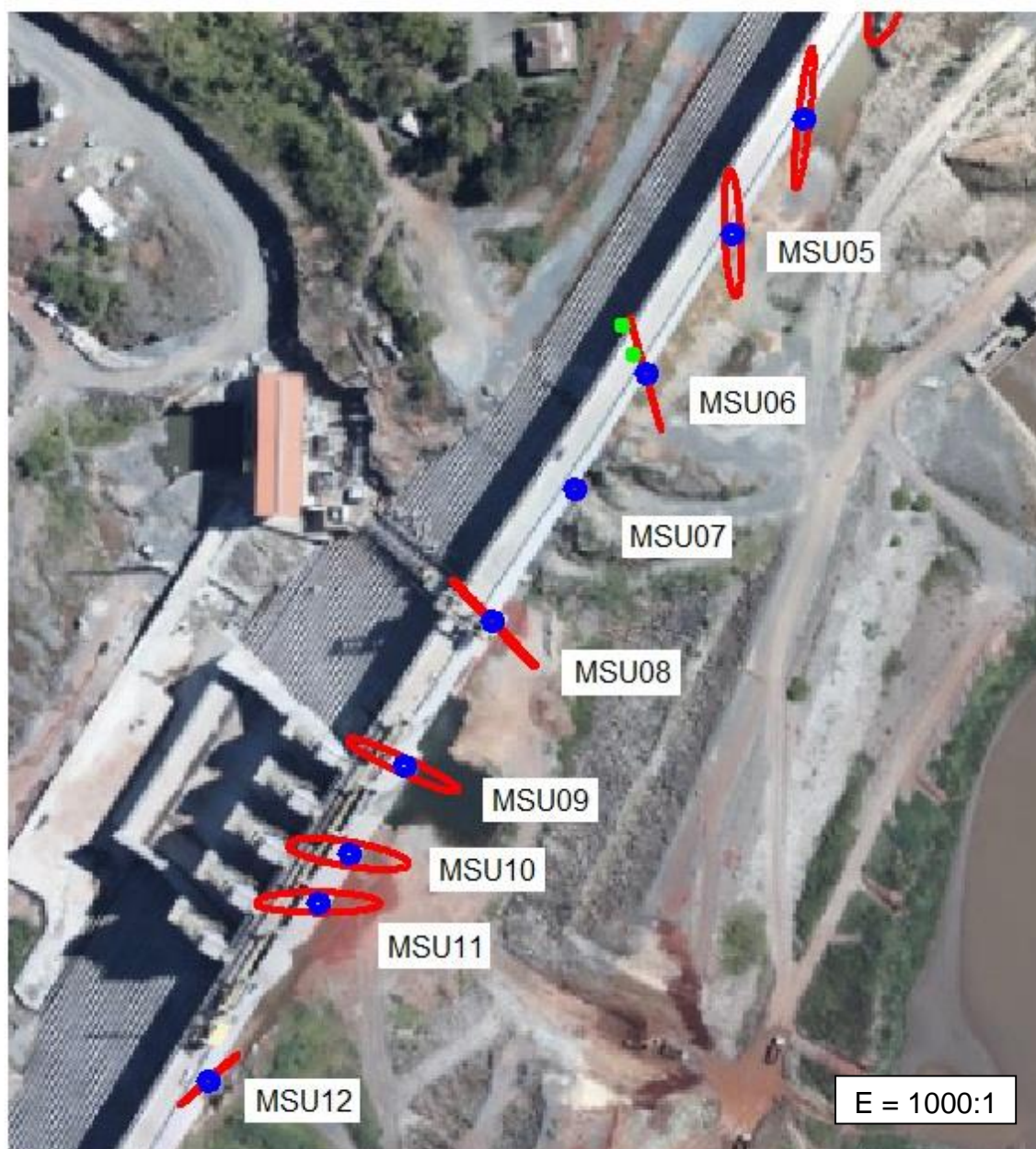


FIGURA 81 – ELIPSES DE ERRO DOS PONTOS A MONTANTE  
FONTE: O AUTOR

Os pontos MSU08 e MSU09, localizados na região central da barragem, têm deslocamentos maiores na direção do eixo y e menores na direção do eixo x.

Na região central observam-se orientações de praticamente  $90^\circ$  em relação ao eixo x. Nos pontos distantes do centro e próximos aos apoios, os vetores em x e y são decompostos, orientando as elipses nas direções de seus maiores deslocamentos.

A implementação do processo para realizar a representação gráfica dos vetores de deslocamentos e dos pontos MGEs e EGIs não foi finalizada até a conclusão desta tese.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

A proposta apresentada por esta pesquisa, dentro de uma ideia de multidisciplinaridade entre as Ciências Geodésicas e demais áreas, combina técnicas espaciais e terrestres para determinação de coordenadas. Seguindo as diretrizes da IAG, busca-se a integração entre as diferentes áreas, utilizando estudos realizados no âmbito da Geodésia, Geologia e Engenharia Civil através da determinação do coeficiente de correlação de Pearson.

O estudo de caso realizado na UHE Mauá inova ao integrar técnicas GNSS e de levantamentos tridimensionais terrestres para a auscultação geodésica, utilizando ajustamento das observações e testes estatísticos.

A partir de observações coletadas por levantamentos GNSS e terrestres pelo método de triangulação, trilateração e nivelamento geométrico de primeira ordem em duas campanhas realizadas no fim de 2014 e início de 2015, avaliaram-se a estabilidade da rede geodésica e monitoram-se os pontos à montante, chamados de MSUs, à jusante, chamados de MGEs e no interior da galeria de inspeção, chamados de EGIs, dentro de um grau de confiança de 95%.

O objetivo do desenvolvimento do sistema é a automatização do manejo do volume de dados resultantes do monitoramento de estruturas. Para tanto, o sistema computacional foi implementado utilizando *software* MatLab e os conhecimentos sobre ajustamento de observações, testes estatísticos, transformação de referenciais, levantamentos geodésicos, determinação de coordenadas e cálculo de coeficiente de correlação.

O sistema desenvolvido para combinar os dados das observações espaciais e terrestres do monitoramento geodésico tem grande potencial para centralizar o grande volume de dados originados a partir de um trabalho de monitoramento de uma grande estrutura e também para facilitar e agilizar o processamento destes dados.

A combinação das observações espaciais e terrestres foi possível com a aplicação do Método Paramétrico no Ajustamento de Observações pelo Modelo Matemático de Variação de Coordenadas. No ajustamento, utilizaram-se as coordenadas oriundas do GNSS reduzidas a uma mesma época e transformadas para o sistema de barragem como coordenadas iniciais. As observações utilizadas no ajustamento foram os ângulos verticais, horizontais e as distâncias inclinadas observados com a estação total. O nivelamento geométrico foi incorporado utilizando-se um desnível determinado por este método para atribuir maior precisão nas coordenadas  $z$ . Desta forma, após realizar as iterações, obtiveram-se as coordenadas ajustadas dos marcos da rede geodésica.

De posse das observações espaciais para determinação de coordenadas dos marcos geodésicos da rede de monitoramento, o sistema reduziu as coordenadas à época de referência, considerando o deslocamento sofrido pela placa tectônica em relação sistema de referência do posicionamento GNSS. Observando-se que as coordenadas resultaram desiguais estatisticamente a um grau de confiança de 95%, foram utilizadas as coordenadas dos marcos geodésicos da rede obtidas na época de referência na verificação de deslocamentos dos pontos monitorados, para evitar uma falsa detecção de deslocamento da estrutura.

A interface combinou observações para obter as coordenadas tetradimensionais e descrever o comportamento da estrutura antrópica ao longo do tempo. Analisando as tabelas que contêm as coordenadas dos pontos monitorados chamados de MSUs e MGEs constatou-se que, após os testes estatísticos, as coordenadas são estatisticamente diferentes. Logo, houve movimentação dos pontos monitorados, principalmente no eixo “ $y$ ” que corresponde ao sentido do rio.

As elipses de erro plotadas sobre os pontos MSUs ilustram os valores e as direções dos desvios-padrão máximo e mínimo ( $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ) calculados para as coordenadas de cada ponto de monitoramento e observou-se que na região central da barragem, os deslocamentos maiores ocorrem na direção “ $y$ ” que



coincide com o sentido do rio. Os pontos centrais são mais suscetíveis à pressão da água por causa da distância dos apoios ou ombreiras.

Após as coordenadas em épocas distintas serem constatadas como estatisticamente diferentes cabe ao profissional da Engenharia Civil avaliar o grau da movimentação dentro do critério de segurança adotado.

As movimentações ou deslocamentos podem ocorrer devido às variações térmicas decorrentes das estações do ano e em razão da variação do nível do reservatório, que entre as campanhas consideradas teve um aumento de 2,8m.

Esta combinação das técnicas geodésicas proporciona ao destinatário final os resultados necessários à sua área de atuação, para o encaminhamento das providências que lhe são cabíveis.

Na integração dos monitoramentos geodésicos, geológicos e da Engenharia Civil, o sistema computacional utiliza o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson que avalia o grau de influência de uma variável sobre a outra. Os dados obtidos visando esta integração são insuficientes para validação desta etapa, porque houve necessidade de realizar novos furos no interior da galeria de inspeção, para instalação da fibra óptica e de novos equipamentos de drenagem, o que impossibilitava a permanência no local com os equipamentos geodésicos.

Neste momento da pesquisa pode-se avaliar o sistema como funcional, com forma de registro e armazenamento de dados que atende aos requisitos a ela impostos. Porém, para utilização por usuários de áreas distintas da Geodésia, recomenda-se cautela em razão da ausência de banco de dados no sistema, pois a rotina apresenta muitas etapas que requerem a interação com o usuário.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Visando uma interface do sistema computacional mais amigável ao usuário, recomenda-se a sua implementação com banco de dados, automatizando a geração de resultados, sem a necessidade de armazenamento de arquivos de dados externos que devem ser continuamente carregados.

O sistema deve ser alimentado com as informações provenientes dos monitoramentos geodésicos, geológicos e da Engenharia Civil para ter capacidade analisar e correlacionar estas áreas. Para tanto, é necessário aumentar o número de observações das áreas da Geologia e Engenharia Civil para uma análise correlacional robusta.

Deve-se também realizar a melhoria do módulo de representação gráfica, proporcionando a visualização dos pontos ainda não contemplados nesta versão, e também possibilitar a geração de gráficos para facilitar a interpretação do usuário. Além disso, deve permitir a entrada de dados derivados de equipamentos produzidos por quaisquer fabricantes.

Recomenda-se que os estudos neste âmbito sejam continuados, pois o tema está longe do exaurimento. Uma proposta é o estudo específico sobre o comportamento do sinal emitido pelo medidor eletrônico de distância da estação total sobre o lago formado pela barragem e sua influência sobre as visadas nos levantamentos terrestres, uma vez que ocorreram diferenças principalmente na coordenada “z”, na ordem do centímetro, quando comparados com os métodos direto (Nivelamento Geométrico) e indireto (Nivelamento Trigonométrico).

Um fato que colabora para esta recomendação é que, quando comparados os desníveis oriundos de cada método, a diferença entre eles está na ordem do milímetro.

Apesar de não fazer parte desta pesquisa foram realizados levantamentos gravimétricos sobre a Barragem ao longo da pista de rolamento. Os resultados preliminares demonstram variações das anomalias de Bouguer que poderão auxiliar na avaliação de possíveis variações da densidade do concreto ou mesmo em função da variação do nível de água do reservatório.

Portanto recomenda-se uma densificação das observações incluindo as galerias de inspeção e os degraus da barragem a jusante.

## REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Geração**: 2010. Disponível em: <[http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id\\_noticia=8938](http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=8938)> Acessado em 10 de maio de 2011.
- ANDRADE, J. B de. **Navstar – GPS**. Departamento de Geociências, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 1988.
- ANDRIANOVA, S. D. **High-accuracy geodetic monitoring during construction and occupancy of modern buildings**. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 45. Number 2, p. 66-70. Springer New York, 2008.
- BRASIL, Decreto-Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 181, p.1, 21 set., 2010. Seção 1.
- CARGNELUTTI FILHO, A. LOPES, S. J. TOEBE, M. SILVEIRA, T. R. SCHWANTES, I. A. **Tamanho de amostra para estimação do coeficiente de correlação de Pearson entre caracteres de *Crambe abyssinica***. Revista Ciência Agronômica, v.42, n1, p.149-158. Centro de Ciências Agrárias – UFC. Fortaleza. Ceará. Jan-mar, 2011.
- CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Núcleo de São Paulo. **Guia Básico de Segurança de Barragens, São Paulo**: 2001. 78p. Manual.
- CHAVES, J. C. **Controle de deformações em barragens: métodos de monitoramento e viabilidade de utilização do GPS**. 1994. 197f. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.
- CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL. **Usina Hidrelétrica Mauá**. Disponível em: <<http://www.usinamaua.com.br/>>. Acesso em: 11/02/2013.
- CONSTANTINO, D. ANGELINI, M. **Geodetic monitoring applied to a mine area**. Applied Geomatics. Volume 3. Number 2, p. 61-74. Springer Berlin / Heidelberg. 2011.
- COPEL. **2º Boletim trimestral de monitoramento fase operacional (MC-02 – EC-13)**. Programa de monitoramento sismográfico da Usina Hidroelétrica Mauá. Contrato Copel SLS/DCSE Nº 45858/2009. São Paulo. 2013.
- COPEL. Disponível em <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F62B5CF75B928C3D403257745004890B2>. Gerado: 2014. Acessado em 20/06/2015.
- CRANENBROECK, J. **State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant**. FIG Working Week 2011. Bridging the gap between cultures. Marrakech, Marocco, 18-22 May, 2011.

DA CRUZ, W. **Impacto causado pela evolução dos medidores eletrônicos de distância no processo de calibração.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados.** Editora da UFPR: Curitiba, 2002.

DREWES H., HEIDBACH O. **The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean.** Submitted to C. Pacino et al. (Eds.). IAG Scientific Assembly “Geodesy for Planet Earth”. Buenos Aires, August 31 to September 4, 2009. IAG Symposia.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2001.

FAZAN, J. A. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2010.

FERNÁNDEZ, J. et. al. **Geodetic methods for detecting volcanic unrest: a theoretical approach.** Bulletin of Volcanology. Volume 60. Number 7, p. 534-544. Springer Berlin / Heidelberg. 1999.

FIGUEIRA, I, F, R. et. al. **Levantamento Geológico e Instrumentação na UHE Mauá.** Comitê Brasileiro de Barragens. XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Porto de Galinhas. Pernambuco. 2013.

GAGG, G. **Aplicação da gravimetria na detecção de subsidência na região de barragens.** II Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia (SAPGU). UFRGS, 2007.

GAO, J. et. al. **A new method for minig deformation monitoring with GPS-RTK.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 21, Supplement 3, December 2011.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** Curitiba: Ed. UFPR, 2004.

GHILANI, C. **Least squares adjustments I&II.** Pennsylvania Society of Land Surveyors Annual Conference. Hershey, PA, 2002.

GHILANI, C. **Adjustment computations: spatial data analysis.** 5 ed. New Jersey: Wiley, 2010.

GHILANI, C. D., WOLF P. R. **Elementary surveying: an introduction to geomatics.** - 13ª edição, Nova Jersey: 2012.

GRANEMANN, D. **Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

GUERRA, M. J. DONAIRE, D. **Estatística Indutiva: Teoria e Aplicações**. 5 ed. São Paulo: LTC, 1991.

IAG. **The IAG in the Framework of International Science**. Disponível em [http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=text&id\\_c=12&id\\_t=111](http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=text&id_c=12&id_t=111). Geração: 2003. Acessado em 24 de maio de 2015.

IBGE. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>. Acessado em 23 de junho de 2015.

INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento – Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 1ª ed. Brasília, 2013.

ITAIPU. **Jornal de Itaipu Eletrônico**. Disponível em [http://jie.itaipu.gov.br/jie/files/files2009/image/20130130/triortogonal\\_fechado.jpg](http://jie.itaipu.gov.br/jie/files/files2009/image/20130130/triortogonal_fechado.jpg). Acessado em 15 de fevereiro de 2013.

JEKELI, C. **Geometric Reference Systems in Geodesy**. Ohio State University. 2006.

JORDAN, W. **Tratado general de topografia**. 6.ed. D. F. Mexico: G. Grill, 1981.

KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications**. Michigan: Ann Arbor Press, Inc, 1996.

LACTEC. **Atendimento aos requisitos da LP 9589 UHE Mauá**. Consórcio Energético Cruzeiro do Sul, 2007.

LEICA. **Leica TS11/TS15 User Manual**. Version 2.0. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Switzerland. 2011.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3th. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Setores de Ciências Exatas e Tecnologia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. João Bosco Lugnani. Curitiba, 1987. 134 p.

MARTINI, L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

MATOS, S. F. **Avaliação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto. Estudo de caso: Deformímetros e tensômetros para concreto na barragem de Itaipu.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002.

MIRANDA, F. A., FAGGION P. L., VEIGA, L. A. **Método para o monitoramento de pontos em áreas instáveis.** Boletim de Ciências Geodésicas, sec. Artigos, Curitiba, v. 15, n° 4, p.498-513, outubro a dezembro, 2009.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento e análise estatística de observações aplicados na detecção de deformações.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1988

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** 2ª ed. vol. 1. 476 p. Editora Unesp. São Paulo, 2008.

MORAES, C. V. **Aplicação do ajustamento às poligonais.** 1997. Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MSI. Micro Sensores Industrial. Disponível em [http://www.microsensores.com.br/medidor\\_triortogonal\\_de\\_junta.htm](http://www.microsensores.com.br/medidor_triortogonal_de_junta.htm). Acessado em 15 de fevereiro de 2013.

MUGUIO, M. R. **Implantação e análise da estação GNSS para o monitoramento contínuo da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

NADAL, M. A. D. **Controle e operação remota de estações totais robotizadas voltado à auscultação geodésica.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

NEVES, R. V. **Processamento e análise de Levantamentos Geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas civis.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

PALAZZO, D. R. **O uso de uma ETR associada a um Sistema Geodésico de Referência para o monitoramento dinâmico de pontes.** Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

REZENDE, D. A. **Engenharia de Software e Sistemas de Informação.** 1. Ed. RJ: Brasport, 1999.

RIBEIRO, F. C. D. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para o monitoramento geodésico de barragens: estudo de caso.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2008.

SANTIBAÑEZ, S. A. F. **Avaliação da influência do modelo de Ajustamento de Observações e da densidade de pontos Laser Scanner Terrestre para a representação paramétrica de superfícies planas.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications.** 2<sup>nd</sup>.ed, Berlin, New-York: Walter de Gruyter, 2003

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da barragem da usina hidrelétrica Mauá utilizando irradiação tridimensional.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

SILVA, R. N. F. **Avaliação da técnica de Nivelamento Trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

SOARES, M., FAGGION, P. L., VEIGA, L. A. K., NADAL, C.A. **Relatório Técnico 02-2012 Projeto PD 6491-0227/2011 - Monitoramento Geodésico – Primeiros Resultados – Geodésia – Nivelamento Geométrico.** Setembro de 2012.

SOARES, M., FAGGION, P. L., VEIGA, L. A. K., NADAL, C.A. DA CRUZ, W. **“Levantamento Geológico - Estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o Monitoramento Geodésico nos pontos de risco”.** Programa P&D – Copel Geração e Transmissão S.A. Relatório referente ao projeto PD-6491-0227/2011. Curitiba. Emissão: Junho de 2015.

SUCI, F. M. **Estudo sobre a estabilidade da rede geodésica de monitoramento na UHE de Salto Caxias.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

TEIXEIRA, N. N. **Análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global.** Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

US ARMY. **Deformation monitoring and control surveying.** U. S. Army Corps of Engineers. Engineer Manual 1110- 1-1004. Washington, DC, 1994. Disponível em: <http://gisceu.net/PDF/u44.pdf>. Acesso em: 07/01/2013.



US ARMY. **Structural Deformation Surveying**. Washington: Engineer Manual, 292p. 2002.

WOLF, P. R. **Adjustment computations**: practical least squares for surveyors. 2.ed. Wisconsin: PBL, 1980.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonização de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso da U. H. de Salto Caxias**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

### DOCUMENTOS CONSULTADOS

ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; BOUCHER, C. **ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications**, J. Geophys. Res., 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561. 2002.

ANDOLFATO, S. H. D. **Sistema de automação de níveis digitais**. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

IBGE. **Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos**. Resolução PR n.22 de 21.07.1983.

IBGE. **Posicionamento por Ponto Preciso**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>. Acessado em 17 de maio de 2012.

KAHMEN, H., FAIG, W. S. **Surveying**. Berlim; New York: Walter de Gruyter, 1994.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento Por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma Solução Para a Geodinâmica**. Brazilian Journal of Geophysics, vol. 18(1), 2000.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: an introduction**. Ed 3. Berlin: Springer Verlag, 1996.

SEGANTINE, P. C. **GPS: sistema de posicionamento global**. São Carlos: EESC/USP, 2005.

SHAAL, R. E. LAROCA, A. P. C. **A tecnologia GPS aplicada à detecção de deslocamentos verticais causados por forças estáticas e dinâmicas**. Revista Brasileira de Cartografia. N° 59/02, p.181-190, Agosto, 2007.

TORGE, W. **Geodesy**. Berlin. Walter de Gruyter, 2001

UFPR. **Normas para apresentação de documentos científicos**.2. Ed. Editora UFPR: Curitiba, 2007.

USINAMAUA. **Concluído o lançamento de concreto na barragem da UHE Mauá**. Disponível em <http://www.usinamaua.com.br/noticia/35>. Acesso em 14/05/2012. Publicado em 16/03/2011.